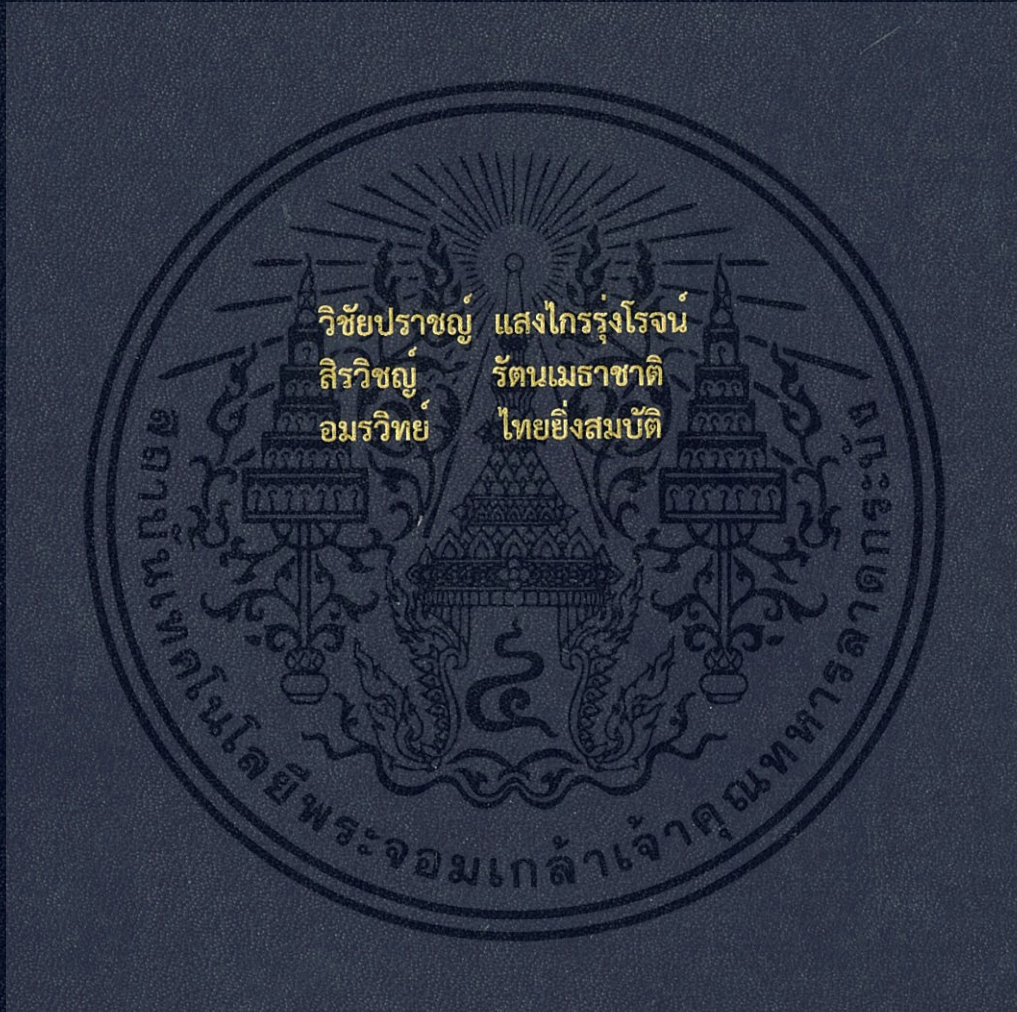


การศึกษาการเกิดโพรงอากาศของกังหันน้ำในการไหลตามแนวแกน  
STUDY OF CAVITATION IN AXIAL FLOW TURBINE



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล  
คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ปีการศึกษา 2560

การศึกษาการเกิดโพรงอากาศของกังหันน้ำในการไหลตามแนวแกน

STUDY OF CAVITATION IN AXIAL FLOW TURBINE



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2560

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# STUDY OF CAVITATION IN AXIAL FLOW TURBINE



A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT

OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF

BACHELOR OF ENGINEERING IN MECHANICAL ENGINEERING

FACULTY OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

2017

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาานิพนธ์ปีการศึกษา 2560

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การศึกษาการเกิดโพรงอากาศของกังหันน้ำในการไหลตามแนวแกน

Study of Cavitation in Axial Flow Turbine

ผู้จัดทำ

1. นาย วิชัยปราชญ์ แสงไกรรุ่งโรจน์ 57011169
2. นาย สิริวิชญ์ รัตน์เมธาชาติ 57011361
3. นาย อมรวิทย์ ไทยยิ่งสมบัติ 57011488



อาจารย์ที่ปรึกษา

( ผศ.มณฑล ใจกุล )

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การศึกษาการเกิดพองอากาศของกึ่งหันน้ำในการไหลตามแนวแกน

นายวิชัยปราชญ์	แสงไกรรุ่งโรจน์	57011169
นายสิริวิชญ์	รัตนเมธาชาติ	57011361
นายอมรวิทย์	ไทยยิ่งสมบัติ	57011488
ผศ.มณฑล	ใจกุล	อาจารย์ที่ปรึกษา ปีการศึกษา 2560

### บทคัดย่อ

โครงการนี้จัดทำเพื่อศึกษาและสร้างชุดทดสอบการเกิดพองอากาศของกึ่งหันน้ำตามแนวแกน สำหรับใช้ในวิชา การทดลองวิศวกรรมเครื่องกล เพื่อเพิ่มความรู้ความเข้าใจในปัจจัยของการเกิดพองอากาศ ซึ่งในการศึกษาจะมีการเปลี่ยนจำนวนปีกกึ่งหันน้ำที่จำนวน 3 ใบพัด, 4 ใบพัด, 5 ใบพัด ขนาดมุมปีกกึ่งหันน้ำระหว่าง 20 องศา ถึง 80 องศา โดยการออกแบบใบพัดจะใช้มาตรฐาน นากา 6510 ซึ่งในการทดสอบจะใช้วิธีการสังเกตการเกิดพองอากาศเมื่อเปลี่ยนจำนวนใบพัดและมุมปีกกึ่งหัน จากการทดลองและคำนวณสมการคาวิเทชันนัมเบอร์พบว่าพองอากาศจะเริ่มเกิดที่อัตราการไหล 380 ลิตรต่อนาที มุมปะทะ 60-80 องศา ของใบพัดทั้ง 3 ชนิด ที่ 450 ลิตรต่อนาที คาวิเทชันจะเริ่มเกิดที่มุมปะทะ 40-60 องศา ของใบพัดชนิด 3 ใบ และ 4 ใบ ชนิด 5 ใบจะเริ่มเกิดตั้งแต่มุมปะทะ 20-80 องศา ดังนั้นสามารถหลีกเลี่ยงการเกิดพองอากาศได้โดยมีการใช้อัตราการไหลและมุมปะทะที่เหมาะสมเพื่อหลีกเลี่ยงความเสียหายที่จะเกิดขึ้นจากพองอากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## STUDY OF CAVITATION IN AXIAL FLOW TURBINE

Vichaiprat	Sangkrairungroj	57011169
Siravich	Ratanametachat	57011361
Amornvit	Thaiyingsombat	57011488
Asst.Prof.Monthol	Jaikusol	Advisor

Year 2017

**Abstract**

This project is prepared to study and test cavitation of axial flow turbine used in the Mechanical Engineer Laboratory to increase the understanding of the factor of cavitation by varied the number of turbine blades from three turbine blades to five blades, angle of attack between 20 degrees to 80 degrees. Moreover, the design of the testing blades base on NACA 6510. In this experiment will observe cavitation when change a number of turbine blade and angle of attack. The results of the experiment and calculation from cavitation number have shown that cavitation occur at 380 Lite/minute from 60 to 80 degree of all 3 Blade and cavitation occur at 450 Lite/minute from 60 to 80 degree of 3 Blade and 4 Blade but 5 Blade start from 20 to 80 degree. Therefore, Cavitation can be avoided by applying appropriate flow rates and angles of attack to avoid damage caused by bubbles.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์นี้สำเร็จได้ด้วยความช่วยเหลือและความร่วมมือจากบุคลากรหลายท่านด้วยกันซึ่งคนแรกคือ

ขอขอบคุณคือ ผู้ช่วยศาสตราจารย์มณฑล ใจกุศล อาจารย์ที่ปรึกษา ผู้ที่คอยให้คำแนะนำในด้านต่างๆและให้ความช่วยเหลือพวกเรามาตลอดจนงานสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

ขอขอบรองศาสตราจารย์ ดร.จารุวัตร เจริญสุข ที่ให้การสนับสนุนด้านอุปกรณ์เครื่องมือวัด

ขอขอบคุณคณาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกลทุกท่าน สำหรับคำแนะนำและความช่วยเหลือในด้านต่างๆ

ขอขอบคุณพี่นก ที่ให้ความสะดวกด้านธุรการเป็นอย่างดีเสมอมา

ขอขอบคุณคณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังที่ช่วยมอบความรู้และประสบการณ์ที่มีค่ายิ่งตลอด 4 ปีที่ผ่านมา ตลอดจนเพื่อนๆทุกคนที่คอยเป็นกำลังใจเสมอมา

ขอขอบคุณบุคคลที่สำคัญที่สุดคือ บิดา มารดา ที่เลี้ยงดูข้าพเจ้าเป็นอย่างยิ่ง พร้อมทั้งให้โอกาสในการศึกษาอย่างเต็มที่ และยังให้กำลังใจเรื่อยมาจนสำเร็จทำปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ ข้าพเจ้าจึงขอกราบขอบคุนมา ณ ที่นี้

วิชัยปราชญ์ แสงไกรรุ่งโรจน์

สิริวิษณุ รัตน์เมธาชาติ

อมรรวิทย์ ไทยยิ่งสมบัติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VII
สารบัญรูป.....	VII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	1
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	1
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	2
1.5 ขั้นตอนของการศึกษา.....	2
บทที่ 2 ทฤษฎี.....	3
2.1 คาวีเทชั่น.....	3
2.2 คุณสมบัติสำคัญของการเกิดคาวีเทชั่น.....	4
2.2.1 การเริ่มต้นของคาวีเทชั่น.....	4
2.2.2 การยุบตัวของฟองอากาศ.....	5
2.2.3 การบิดเบี้ยวระหว่างการล่มสลายของฟองอากาศ.....	7
2.2.4 ความเสียหายที่เกิดจากคาวีเทชั่น.....	9
2.2.5 การสังเกตคาวีเทชั่นที่เกิดจากฟองอากาศ.....	10

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
2.2.6 เสียงที่เกิดจากควิเทชัน.....	11
2.2.7 การเรืองแสงของโพรงอากาศ.....	18
2.2.8 การเกิดควิเทชันบนกังหันน้ำ.....	19
2.3 กังหัน.....	20
2.3.1 กังหันน้ำแคปแลน.....	20
2.4 ชนิดการไหลของของไหล.....	21
2.4.1 การไหลแบบคงตัว.....	21
2.4.2 การไหลแบบไม่คงตัว.....	21
2.4.3 การไหลแบบเอกภาพ.....	21
2.4.4 การไหลแบบอนเอกภาพ.....	21
2.4.5 การไหลแบบราบเรียบ.....	21
2.4.6 การไหลแบบปั่นป่วน.....	21
2.5 เลขเรย์โนลด์.....	22
2.6 ระยะปากทางเข้า.....	23
2.7 สมการความต่อเนื่อง.....	23
2.8 สมการพลังงาน.....	24
2.9 สมการเบอร์นูลี.....	24
2.10 ค่าการสูญเสียหลักและการสูญเสียรองสำหรับการไหลภายในท่อ.....	25
2.10.1 การสูญเสียหลัก.....	25

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
2.10.2 การสูญเสียรอง.....	25
2.11 สัมประสิทธิ์ความผิด.....	26
2.12 แรงยกและแรงจุด.....	27
2.13 แพนอากาศ.....	28
2.14 การหาคาวิทเชิน.....	30
บทที่ 3 การออกแบบชุดทดลอง.....	32
3.1 การเลือกคุณสมบัติปั๊มที่ใช้ในการทดลอง.....	32
3.2 ลักษณะของชุดทดสอบการเกิดโพรงอากาศ.....	32
3.3 ทำนายการเกิดคาวิทเชินของชุดทดลอง.....	34
3.4 เครื่องมือและอุปกรณ์การทดลอง.....	34
3.5 วิธีการทดลอง.....	34
บทที่ 4 ผลการทดลองแลวิเคราะห์ผลการทดลอง.....	35
บทที่ 5 บทสรุปการดำเนินงานและข้อเสนอแนะ.....	43
5.1 สรุปผลการดำเนินงาน.....	43
บรรณานุกรม.....	44

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญตาราง

ตารางที่

หน้า

2.1 เปรียบเทียบคุณสมบัติของแพนอากาศนากา 6510.....30



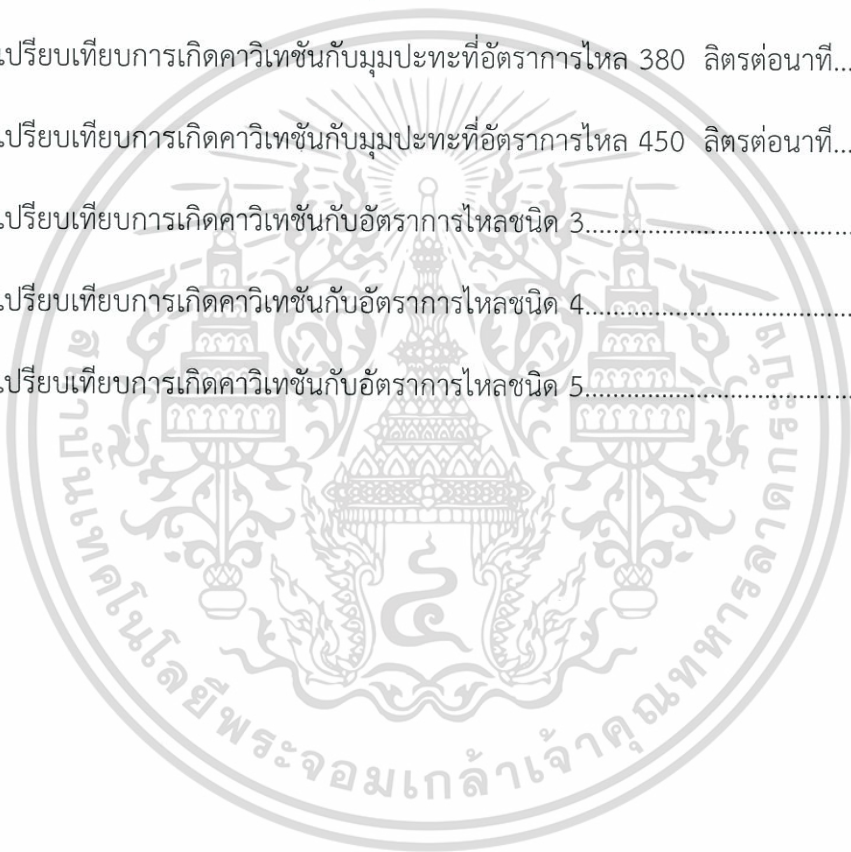
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญภาพ

รูปที่	หน้า
2.1 แสดงปรากฏการณ์ควิวเทชัน.....	3
2.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันและรัศมี.....	5
2.3 เป็นชุดภาพแสดงการพัฒนาของโมโคเจ็ทของฟองอากาศยวบตัวใกล้กับผิววัตถุ.....	7
2.4 แสดงการพัฒนาตัวของโมโคเจ็ทเมื่อฟองอากาศยวบตัวใกล้กับผนัง.....	8
2.5 แสดงความไม่เสถียรของฟองอากาศ.....	9
2.6 แสดงความเสียหายของ francis turbine ที่เกิดจากควิวเทชัน.....	9
2.7 แสดงความเสียหายของ kaplan turbine ที่เกิดจากควิวเทชัน.....	10
2.8 ชุดรูปถ่ายที่ประกอบไปด้วยการเจริญเติบโตและล่มสลายของฟองอากาศ.....	11
2.9 แสดงการล่มสลายของฟองอากาศ (ซ้าย) และ ความไม่เสถียรภาพของชั้นของเหลว(ขวา).....	12
2.10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสเปกตรัมพลังงานเสียงและความถี่.....	12
2.11 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นของสเปกตรัมและความถี่ที่ลดลง.....	14
2.12 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันและเวลา.....	15
2.13 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระตุ้นและปริมาตรสูงสุด.....	16
2.14 แสดงลักษณะเครื่องกังหันน้ำแบบแคปแลน.....	20
2.15 แสดงภาพของการไหลเข้าของของไหล.....	23
2.16 แผนภูมิ มูดี้ ( Moody Diagram) .....	26
2.17 ค่าความขรุขระเฉลี่ยของวัสดุท่อชนิดต่างๆ.....	27
2.18 ภาพแสดงแรงยกและแรงดูด.....	27
2.19 แสดงส่วนประกอบของแพนอากาศ.....	29

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1 ภาพแสดงรูปชุดทดสอบการเกิดโพรงอากาศจริงที่ได้รับการติดตั้งอุปกรณ์.....	32
3.2 ภาพแสดงใบพัดชนิด 3 ใบ.....	33
3.3 ภาพแสดงใบพัดชนิด 4 ใบ.....	33
3.4 ภาพแสดงใบพัดชนิด 5 ใบ.....	33
4.1 แสดงการเปรียบเทียบการเกิดควิวเทชันกับมุมปะทะที่อัตราการไหล 250 ลิตรต่อนาที.....	35
4.2 แสดงการเปรียบเทียบการเกิดควิวเทชันกับมุมปะทะที่อัตราการไหล 320 ลิตรต่อนาที.....	36
4.3 แสดงการเปรียบเทียบการเกิดควิวเทชันกับมุมปะทะที่อัตราการไหล 380 ลิตรต่อนาที.....	37
4.4 แสดงการเปรียบเทียบการเกิดควิวเทชันกับมุมปะทะที่อัตราการไหล 450 ลิตรต่อนาที.....	38
4.5 แสดงการเปรียบเทียบการเกิดควิวเทชันกับอัตราการไหลชนิด 3.....	39
4.6 แสดงการเปรียบเทียบการเกิดควิวเทชันกับอัตราการไหลชนิด 4.....	40
4.7 แสดงการเปรียบเทียบการเกิดควิวเทชันกับอัตราการไหลชนิด 5.....	41



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ที่มาและความสำคัญ

เนื่องจากในภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกลได้มีการศึกษาเกี่ยวกับการเกิดโพรงอากาศในปั๊มน้ำ ทำให้เกิดความสนใจเกี่ยวกับการเกิดโพรงอากาศของกังหันน้ำ ว่ามีการส่งผลกระทบต่อกังหันน้ำอย่างไร และเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงปัจจัยต่างๆของกังหันน้ำแล้ว การเกิดโพรงอากาศจะมีการเปลี่ยนแปลงไปอย่างไร ซึ่งจากการค้นคว้าพบว่า โดยส่วนมากการเกิดโพรงอากาศของกังหันน้ำ จะจำลองสถานการณ์โดยใช้โปรแกรม และมีส่วนน้อยที่จะสร้างชุดทดลองเพื่อที่จะสังเกตการเกิดโพรงอากาศของกังหันน้ำ ซึ่งจากที่กล่าวมาข้างต้น จึงได้มีแนวคิดในการสร้างชุดทดลองการเกิดโพรงอากาศของกังหันน้ำในการไหลตามแนวแกนขึ้นมา เพื่อที่จะสังเกตการเกิดโพรงอากาศและศึกษาปัจจัยต่างๆที่มีผลต่อการเกิดโพรงอากาศ

### 1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา

1. การนำเอาความรู้ในรายวิชาการศาสตร์ของไหล (Fluid mechanics) และการเขียนแบบเชิงวิศวกรรม (Engineering Drawing) มาประยุกต์ใช้สร้างชุดทดลองเพื่อสังเกตการเกิดโพรงอากาศ
2. เพื่อใช้เป็นชุดทดลองศึกษาการเกิดโพรงอากาศของกังหันน้ำในการไหลตามแนวแกน
3. เพื่อศึกษาตัวแปรต่างๆที่มีผลกระทบต่อ การเกิดโพรงอากาศในกังหันน้ำตามแนวแกน

### 1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

โครงการนี้จะทำการศึกษาการเกิดโพรงอากาศของกังหันน้ำในการไหลตามแนวแกน (Study of Cavitation in Axial flow turbine) โดยจะมีการรับเปลี่ยนตัวแปรต่างๆ ได้แก่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. จำนวนปีกกังหัน (Number of Blade)
2. มุมปะทะกังหันน้ำ (Angle of Attack)
3. อัตราไหล (Flow rate)

#### 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

สามารถนำความรู้ที่ได้เรียนมาในวิชากลศาสตร์ของไหล (Fluid Mechanics) และการเขียนแบบเชิงวิศวกรรม (Engineering Drawing) มาประยุกต์ใช้ได้จริงและเกิดความเข้าใจมากยิ่งขึ้น ซึ่งการทดลองการเกิดโพรงอากาศของกังหันน้ำทำให้มีความเข้าใจเกี่ยวกับสาเหตุและปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดโพรงอากาศมากยิ่งขึ้น ซึ่งชุดทดลองการเกิดโพรงอากาศนี้สามารถนำไปใช้ประกอบในการเรียนการสอนได้อีกด้วย

#### 1.5 ขั้นตอนของการศึกษา

1. ศึกษาทฤษฎีของการเกิดโพรงอากาศ
2. ศึกษาการสูญเสียพลังงานเนื่องจากการไหลภายในระบบ
3. ศึกษาวิธีการทดลองและออกแบบชุดทดลองการเกิดโพรงอากาศ
4. เสนอข้อมูลที่ศึกษามาต่ออาจารย์ที่ปรึกษา เพื่อหาแนวทางการดำเนินงาน
5. ทำการสร้างชุดทดลองและติดตั้งอุปกรณ์
6. เริ่มทำการทดสอบเพื่อทำการบันทึกผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

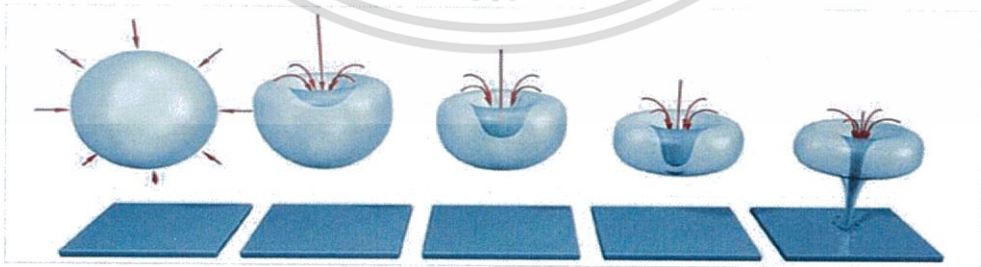
## บทที่ 2

# ทฤษฎี

### 2.1 คาวีเทชัน

คาวีเทชัน (Cavitation) ถูกใช้ในการอธิบายปรากฏการณ์การเปลี่ยนแปลงสถานะระหว่างของเหลวกับก๊าซเป็นสาเหตุสำคัญที่ทำให้เกิดการสึกหรอและความเสียหายแก่กังหันจะเกิดในการไหลของน้ำ บริเวณการไหลที่มีความเร็วสูงและความดันสถิตลดลงต่ำกว่าความดันไอเมื่อน้ำไหลเข้าสู่บริเวณที่ความดันถูกลดลงถึงความดันไอน้ำจะเดือดและเกิดฟองอากาศฟองอากาศจะไหลไปตามน้ำเมื่อไปถึงบริเวณที่มีความดันสูงฟองอากาศจะยุบตัวทันทีที่กระบวนการนี้เรียกว่า คาวีเทชัน การยุบตัวของฟองอากาศทำให้เกิดพัลส์ความดันสูงเมื่อการยุบตัวเกิดขึ้นซ้ำๆกันหลายพันครั้งต่อวินาทีทำให้เกิดหลุมบนผิวใบมีดโลหะมาพร้อมกับเสียงรบกวน การสั่น และการลดลงของประสิทธิภาพ วัสดุจะเกิดความล้าและการกัดกร่อน ทำให้วัสดุพังทลายในที่สุด

ส่วนใหญ่ คาวีเทชันจะเกิดกับกังหันน้ำ บริเวณทางออกของกังหันและบริเวณที่รับน้ำ โดยทั่วไปมีวิธีลดความเสียหายที่เกิดจากคาวีเทชันอยู่สองทางแรกก็คือการออกแบบกังหันให้มีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้นสองก็คือการเคลือบผิวโลหะซึ่งจะสามารถยืดระยะเวลาการใช้งานของชิ้นส่วนต่างๆของกังหัน โดยทั่วไป คาวีเทชัน เป็นกระบวนการที่ช้าแต่ความเสียหายที่เกิดจากคาวีเทชันจะรุนแรงมากซึ่งเราจะมาศึกษาปัจจัยต่างๆในส่วนถัดไป



รูปที่ 2.1 แสดงปรากฏการณ์คาวีเทชัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.2 คุณสมบัติสำคัญของการเกิดควาวิเทชั่น

### 2.2.1 การเริ่มต้นของควาวิเทชั่น

เราสามารถอธิบายความดันของการไหลของของเหลวที่เข้าสู่ความดันไอและความเป็นไปได้ในการเกิดโพรงอากาศได้โดย ควาวิเทชั่นนัมเบอร์ (Cavitation number ,  $\sigma$ )

$$\sigma = \frac{p_{\infty} - p_v(T_{\infty})}{\frac{1}{2} \rho_L U_{\infty}^2} \quad (2.1)$$

โดยที่  $U_{\infty}$  คือ ความเร็ว เมตรต่อวินาที

$p_{\infty}$  คือ ความดัน ปาสคาล

$T_{\infty}$  คือ อุณหภูมิในการไหล องศาเซลเซียส

$\rho_L$  คือ ความหนาแน่นของของเหลว

$p_v$  คือ ความดันไออิ่มตัว

ในการไหลค่า  $\sigma$  จะลดลง เมื่อการเกิดโพรงเริ่มเกิดขึ้นที่ค่าใดค่าหนึ่งของ  $\sigma$  จะเรียกค่านี้ว่าควาวิเทชั่นเริ่มแรก,  $\sigma_i$  ซึ่งเมื่อค่า  $\sigma$  ต่ำกว่า  $\sigma_i$  จะทำให้จำนวนและขนาดของโพรงอากาศเพิ่มมากขึ้น

สมมติว่าก่อนการเกิดโพรงอากาศขนาดที่ต่ำที่สุดของความดันในการไหลแบบเฟสเดียวถูกกำหนดโดยค่าต่ำสุดของสัมประสิทธิ์ความดัน  $C_{pmin}$  โดยที่ค่าของ  $C_{pmin}$  เป็นค่าลบซึ่งสามารถหาได้ทั้งการทดลองและการคำนวณในการไหลแบบเฟสเดียว แล้วถ้าการเกิดโพรงจะเกิดขึ้นเมื่อความดันลดลงจนถึงความดันไอจะทำให้ค่าวิกฤตของ  $\sigma_i$  มีค่าเท่ากับค่าต่ำสุดของสัมประสิทธิ์ความดัน

$$\sigma_i = -C_{pmin} \quad (2.2)$$

แต่น่าเสียดายที่มีหลายปัจจัยที่ทำให้ค่าจริงของ  $\sigma_i$  มีค่าออกห่างจาก  $-C_{pmin}$  และต้องทำการวิจัยมากขึ้นเกี่ยวกับปัญหานี้เพราะสิ่งสำคัญคือการกำหนดค่า  $\sigma_i$  ที่แม่นยำ

#### ปัจจัยที่สำคัญมี

1. ความสามารถของของเหลวที่จะคงทนต่อความตึงเครียด(Tension)ทำให้โพรงอากาศไม่สามารถขยายขนาดที่สามารถสังเกตได้จนกว่าความดันจะลดลงต่ำกว่าความดันไอ ซึ่งขนาดของความตึงเครียดเป็นฟังก์ชันของสิ่งเจือปนของของเหลว โดยเฉพาะอย่างยิ่งกับขนาดและคุณสมบัติของโพรงอากาศที่เล็กมากๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. การเกิดโพรงจำเป็นต้องใช้เวลาที่จะทำให้ฟองอากาศขยายขนาดที่สามารถสังเกตได้

3. ข้อเท็จจริงที่ว่า การวัดหรือการคำนวณจะให้ค่าต่ำสุดของสัมประสิทธิ์ความดันนั้นก็คือค่าที่เวลาเฉลี่ย หรืออีกทางหนึ่งการไหลในความเป็นจริงจะเป็นการไหลแบบปั่นป่วน(Turbulent flow)ซึ่งใจกลางของการไหลแบบปั่นป่วนความดันจะต่ำกว่าความดันไอ แม้ว่าความดันเฉลี่ยจะมากกว่าความดันไอก็ตาม

ในการประมาณขนาดสูงสุดของฟองอากาศ  $R_m$  จำเป็นต้องใช้การวัดเวลาตอนที่ความดันต่ำกว่าความดันไอ ซึ่งผลจากการประมาณสามารถหาได้จากสมการ

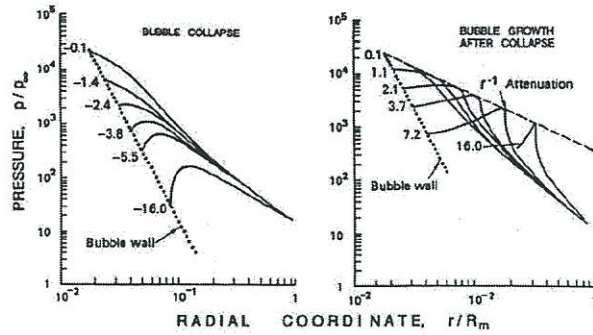
$$R_m \approx 2l(-\sigma - C_{pmin}) \quad (2.3)$$

ถึงว่าขนาดของฟองอากาศเริ่มแรกจะแตกต่างกัน แต่ว่าขนาดใหญ่สุดของฟองอากาศจะมีขนาดใกล้เคียงกัน เพราะฟองอากาศมีอัตราการขยายตัวแบบแอตซิมโทติกและระยะเวลาในการขยายตัวจะไม่ขึ้นอยู่กับขนาดเริ่มแรกของฟองอากาศ ทำให้ฟองอากาศของการเกิดโพรงอากาศมีขนาดใกล้เคียงกัน

### 2.2.2 การยุบตัวของฟองอากาศ

การศึกษาของแฮร์ริงและกิลมอร์เกี่ยวกับการยุบตัวของฟองอากาศ โดยจะเน้นไปในการอัดตัวของของเหลวเพื่อที่จะศึกษาเกี่ยวกับการสร้างคลื่นกระแทก(Shock wave)ในของเหลวเมื่อฟองอากาศเกิดการยุบตัว โดยมีการปรับเปลี่ยนสมการ Rayleigh-Plesset เพื่อที่จะใช้ในการศึกษาการอัดตัวของของเหลว โดยไม่คำนึงถึงผลกระทบจากความร้อน ความหนืดและความตึงผิว

$$\begin{aligned} \left(1 - \frac{1}{c_L} \frac{dR}{dt}\right) R \frac{d^2R}{dt^2} + \frac{3}{2} \left(1 - \frac{1}{3c_L} \frac{dR}{dt}\right) \left(\frac{dR}{dt}\right)^2 \\ = \left(1 + \frac{1}{c_L} \frac{dR}{dt}\right) \frac{1}{\rho_L} \left\{ p_B - p_\infty - p_c \left(t + \frac{R}{c_L}\right) \right\} + \frac{R}{\rho_L c_L} \frac{dp_B}{dt} \end{aligned} \quad (2.4)$$



รูปที่ 2.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันและรัศมี

โดยที่  $c_L$  คือ ความเร็วเสียงในของเหลว

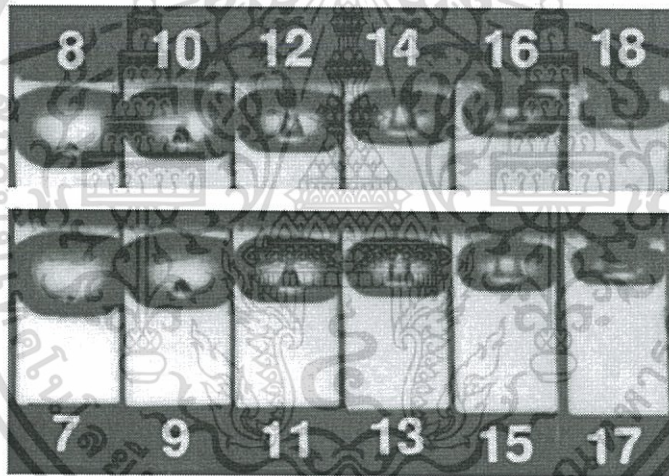
$p_c(t)$  คือ ตัวแปรเป็นส่วนหนึ่งของความดันในของเหลวที่ตำแหน่งศูนย์กลางของฟองอากาศ อย่างไรก็ตามถ้ามีก๊าซบางส่วนที่ไม่ควบแน่นภายในฟองอากาศไปชะลอการยุบตัวของฟองอากาศ หลักสำคัญของการอัดตัวของของเหลวจะไม่ใช่ผลกระทบต่อเปลี่ยนแปลงของฟองอากาศ แต่คลื่นกระแทกก็จะเกิดขึ้นหลังจากเกิดการยุบตัว อีกลีงและเพลสเซต เป็นคนแรกที่ทำการแก้ปัญหาเชิงตัวเลขของสมการการไหลแบบอัดตัวได้ เพื่อสำรวจการก่อตัวของความดันคลื่นกระแทกกระหว่างช่วงการฟื้นตัว (Rebound phase) รูปด้านบนแสดงตัวอย่างของผลลัพธ์ของอีกลีงและเพลสเซตสำหรับการกระจายตัวของความดัน รูปซ้ายมือเป็นการกระจายตัวของความดันก่อนฟองอากาศจะยุบตัว รูปขวามือจะเป็นหลังการยุบตัว

ถึงแม้ว่าผลกระทบทางความร้อนจะน้อยมากสำหรับระยะเวลาการยุบตัว แต่มันจะมีบทบาทมากในขั้นตอนสุดท้ายของการยุบตัวเมื่อของเหลวถูกบีบอัดโดยแรงเฉื่อยของของเหลว ความดันและอุณหภูมิที่คาดว่าจะเกิดขึ้นในก๊าซของฟองอากาศระหว่างการยุบตัวจะสูงมาก เนื่องจากเวลาผ่านไปเร็วมากในระดับไมโครวินาที ซึ่งสามารถสมมุติได้ว่าก๊าซที่ไม่ควบแน่นภายในฟองอากาศมีพฤติกรรมแบบอะเดียแบติก ซึ่งโหมิตะและชิมะหาอุณหภูมิสูงสุดที่จุดศูนย์กลางของฟองอากาศสูงถึง 8800 K แต่ถึงแม้เวลาจะผ่านไปเร็วมาก อีกลีงได้อธิบายการถ่ายเทความร้อนระหว่างก๊าซกับของเหลวว่าเป็นสิ่งสำคัญเพราะมีเรื่องอุณหภูมิภายในและขนาดของฟองอากาศมาเกี่ยวข้องต่อมาฟูจิตะและอะคามัชซีได้คำนวณอุณหภูมิที่จุดศูนย์กลางฟองอากาศแบบเดียวกับโหมิตะกับชิมะ และพบว่าอุณหภูมิมีค่า 6700 K และ 848bar ที่จุดศูนย์กลาง ซึ่งอุณหภูมิและความดันนี้จะสามารถพบได้แค่ในเสี้ยววินาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.2.3 การบิดเบี้ยวระหว่างการล่มสลายของฟองอากาศ

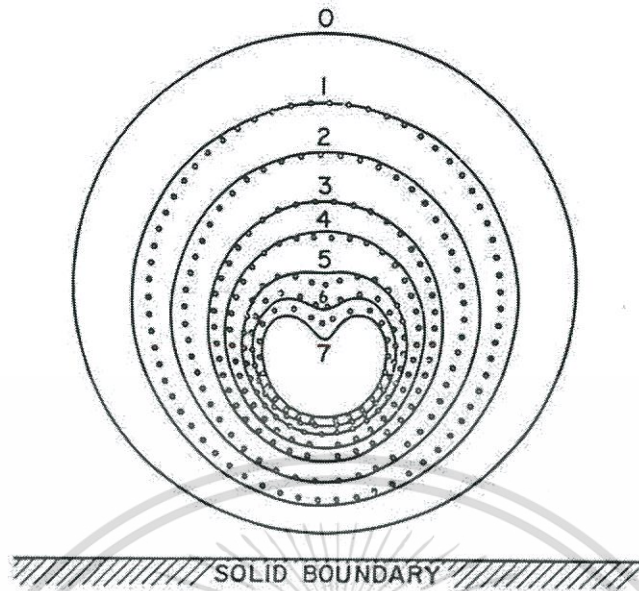
พื้นผิวของฟองอากาศมีความอ่อนไหวต่อความไม่เสถียรภาพของ เรย์แรง์เทย์เร่อ(Rayleigh-Taylor instability) ซึ่งความไม่เสถียรภาพจะเกิดขึ้นเมื่อทิศทางของความเร่งจากไอความหนาแน่นน้อยไปสู่ของเหลวที่มีความหนาแน่นมากกว่า และแน่นอนว่ารูปทรงกลมจะทำให้มีพฤติกรรมบางอย่างที่แตกต่างจากระนาบอินเดอเฟซ ความแตกต่างนี้ถูกค้นพบโดยเบอร์คอฟฟ์ เฟลสเชต และมิชเชล พวกเขาเป็นกลุ่มแรกที่วิเคราะห์ความไม่เสถียรภาพของ เรย์แรง์เทย์เร่อ ของฟองอากาศ ซึ่งตามที่ได้คาดเอาไว้ ฟองอากาศจะมีความไม่เสถียรภาพมากที่สุดเมื่อค่า อนุพันธ์ มีค่ามาก ในระหว่างวงจรการขยายตัวและการยุบตัวของฟองอากาศ จะมีความไม่เสถียรภาพในช่วงแรกของการขยายตัว ทำให้ผิวของฟองอากาศมีความขรุขระเล็กน้อย แต่ที่สำคัญกว่าก็คือช่วงการพินตัวในตอนท้ายของการยุบตัว เมื่อการบีบอัดของฟองอากาศทำให้ค่า อนุพันธ์ เปลี่ยนจากค่าลบน้อยๆไปยังค่าบวกที่มากเมื่อฟองอากาศมีขนาดเกือบจะเล็กสุด



รูปที่ 2.3 เป็นชุดภาพแสดงการพัฒนาของไม่โคเจ็ทของฟองอากาศยุบตัวใกล้กับผิววัตถุ

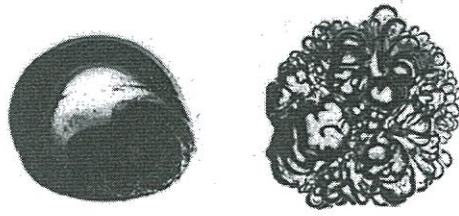
ความไม่เสถียรภาพระหว่างช่วงการพินตัวจะมีผลกระทบมากมาย เมื่อสภาพแวดล้อมของฟองอากาศไม่มีความสมดุล ตัวอย่างเช่น เมื่อฟองอากาศอยู่ใกล้กับผนัง หรือพื้นผิวอิสระ โดยเฉพาะความเสียหายที่เกิดจากการเกิดโพลงอากาศเมื่อใกล้กับผนัง ทำให้เกิดไม่โคเจ็ทพุ่งไปที่ผนัง ซึ่งพื้นผิวของฟองอากาศที่อยู่ห่างจากผนังจะมีความเร่งที่สูงกว่าพื้นผิวของฟองอากาศที่ใกล้กับผนังและแทรกซึมเข้าไปในฟองอากาศซึ่งเหตุนี้ทำให้เกิดไม่โคเจ็ทความเร็วสูง ซึ่งรูปที่2.3 เป็นตัวอย่างในการสังเกตของการเกิดไม่โคเจ็ท และรูปด้านล่างเป็นการพัฒนาตัวของไม่โคเจ็ทเมื่อฟองอากาศยุบตัวใกล้กับผนัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.4 แสดงการพัฒนาตัวของไมโคเจ็ดเมื่อฟองอากาศยุบตัวใกล้กับผนัง  
 ยังมีความไม่สมดุลอื่นๆที่ทำให้เกิดการก่อตัวของไมโคเจ็ด ซึ่งการยุบตัวของฟองอากาศใกล้พื้นผิวอิสระ  
 (Free surface) แท้จริงแล้วจะมีความยืดหยุ่นวิกฤตสำหรับใกล้พื้นผิวแล้วแต่กรณี ซึ่งไมโคเจ็ดจะมีทิศทาง  
 ฟุ้งออกมากกว่าพุ่งเข้าสู่พื้นผิวอิสระ ความไม่สมดุลที่เป็นไปได้อีกประการหนึ่งก็คือกลุ่มฟองอากาศ ซึ่ง  
 ฟองอากาศที่อยู่บริเวณขอบจะมีแนวโน้มที่จะสร้างไมโคเจ็ดพุ่งเข้าสู่ศูนย์กลางของกลุ่ม

เมื่อไม่มีความไม่สมดุลเกิดขึ้น การวิเคราะห์ของความไม่เสถียรภาพ เรย์แรง์เทย์เร่จะแสดงให้เห็นถึง  
 โหมดความไม่เสถียรภาพสูงสุดของการเสีรูบ โหมดความไม่เสถียรภาพสูงสุดนี้จะสังเกตได้ดีเมื่อ  
 การยุบตัวของฟองอากาศอยู่ห่างจากเขตพื้นผิว ดังนั้นการสังเกตการยุบตัวของฟองอากาศ อาจจะมี  
 ปริมาณไวก่อนที่จะยุบ ตัวหลังจากขนาดที่เล็กที่สุด ฟองอากาศจะปรากฏเป็นกลุ่มควันที่เล็กกว่า  
 ฟองอากาศ ตัวอย่างในรูปด้านล่างแสดงให้เห็นโหมดความไม่เสถียรภาพสูงสุดขึ้นอยู่กับสองตัวแปรก็คือ  
 ผลกระทบของความตึงผิวและก๊าซที่ไม่ควบแน่นในฟองอากาศ ซึ่งโหมดความไม่เสถียรภาพสูงสุดถูก  
 นำมาใช้ภายหลังในการวิเคราะห์ทำนายจำนวนการแยกตัวที่สร้างขึ้นระหว่างการยุบตัวของฟองอากาศ



รูปที่ 2.5 แสดงความไม่เสถียรของฟองอากาศ

### 2.2.5 การสังเกตคาวีเทชันที่เกิดจากฟองอากาศ

ปัญหาส่วนมากที่เกิดจากคาวีเทชัน คือ การที่ฟองอากาศนั้นไปกระทบกับวัตถุและทำให้เกิดความเสียหายโดยเรื่องนี้ได้รับการศึกษามาเป็นเวลานานแต่ก็ยังเป็นปัญหาที่แก้ไขได้ยากเนื่องจากต้องมีการศึกษาปฏิกิริยาของวัสดุแข็งแม้ว่าจะมีกฎเกณฑ์ต่างๆที่ออกแบบมาเพื่อช่วยวิศวกรศึกษาการเกิดคาวีเทชันแต่ก็ยังมีคำถามมากมายเกี่ยวกับการล่มสลายของฟองอากาศนี้

การสลายของฟองอากาศเกิดขึ้นที่พื้นผิวของของแข็งเนื่องจากแรงดันพื้นผิวโดยฟองอากาศที่ไปชนซึ่งเป็นวัตถุที่เบาบางกว่าได้สลายตัววัตถุของแข็งนั้นกลับไม่เห็นผลใดๆ แต่ในการใช้งานจริงเมื่อวัตถุของแข็งถูกฟองอากาศชนมากขึ้นเรื่อยๆนั้นจะทำให้เกิดความล้าที่พื้นผิวจนเสียหายได้ในที่สุดโดยรูปที่ 2.6 และ 2.7 แสดงความเสียหายที่เกิดจากฟองอากาศ



รูปที่ 2.6 แสดงความเสียหายของ francis turbine ที่เกิดจากคาวีเทชัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.7 แสดงความเสียหายของ kaplan turbine ที่เกิดจากควิเทชั่น

ความเสียหายจากควิเทชั่นนั้นได้มีการถกเถียงกันและได้ข้อสรุปว่าสาเหตุหลักๆนั้นมาจากคลื่นกระแทกขนาดเล็ก (micro jet) คือ การที่ฟองอากาศเกิดการแตกและมีทิศทางพุ่งเข้าสู่พื้นผิวด้วยความเร็วสูงซึ่งจากการอธิบายถึงปัญหาที่เกิดขึ้นข้างต้นฟองอากาศที่เกิดขึ้นและยุบตัวลงอาจมีการเปลี่ยนแปลงหรือลดการเกิดคลื่นกระแทกนี้ได้โดยจะแสดงให้เห็นในส่วนถัดไป

### 2.2.5 การสังเกตควิเทชั่นที่เกิดจากฟองอากาศ

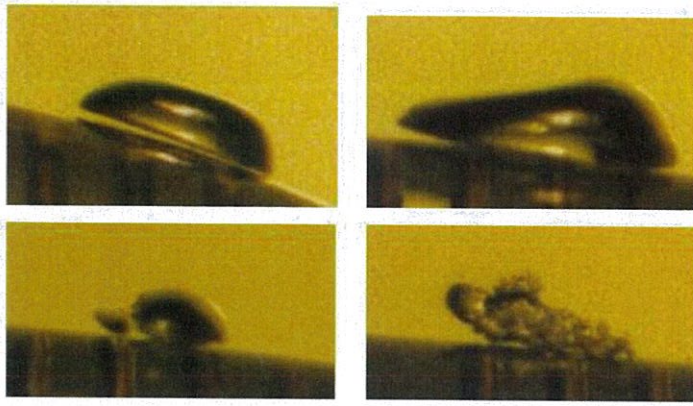
การสังเกตนั้นได้ศึกษาโดยมหาวิทยาลัยโนแคลฟอเนียโดยใช้กล้องความเร็วสูงซึ่งสามารถถ่ายได้ 20,000 เฟรมต่อวินาที และทำการสังเกตการณ์การเติบโตและการล่มสลายของฟองอากาศแบบควิเทชั่นที่เดินทางโดยใช้วิธีการปรับเปลี่ยนสมการ เรย์แรง สำหรับการเคลื่อนที่ของฟองอากาศ อย่างไรก็ตามก่อนที่จะอธิบายถึงข้อสังเกตนั้นจะต้องพิจารณาขนาดของฟองอากาศและชั้นขอบเขตความหนืดในการไหลที่ความเร็วสม่ำเสมอ, ความหนาของชั้นลามินารีใกล้จุดความดันต่ำสุด โดยเปรียบเทียบกับรัศมีสูงสุดของฟองอากาศ

$$\frac{\delta}{R_m} = \frac{1}{2(-\sigma - C_{pmin})} \left\{ \frac{v_L}{U} \right\}^2 \quad (2.5)$$

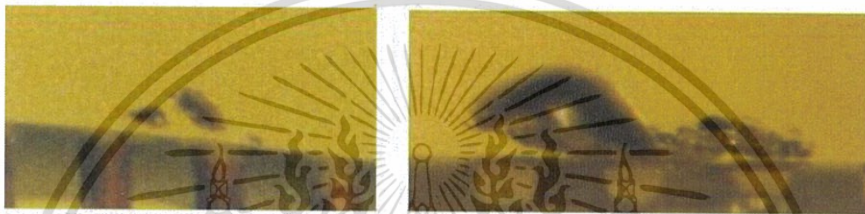
เมื่อค่า  $(-\sigma - C_{pmin})$  มีค่าเท่ากับหรือสูงกว่า 0.1 ทำให้เลขเลโนลด์,  $U/v_L$  สูงจะส่งผลให้เกิดควิเทชั่นเพิ่มมากขึ้น

เมื่อไม่นานมานี้ได้มีการสังเกตการเกิดควิเทชั่นในการไหลไปรอบๆแกนสมมาตรโดยมีข้อสังเกตในรูปที่ 2.8 แสดงถึงการเจริญเติบโตและการล่มสลายของฟองอากาศที่แยกออกหลังจากชนผนัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.8 ชุดรูปถ่ายที่ประกอบไปด้วยการเจริญเติบโตและล่มสลายของฟองอากาศ



รูปที่ 2.9 แสดงการล่มสลายของฟองอากาศ (ซ้าย) และ ความไม่เสถียรภาพของชั้นของเหลว(ขวา)

ในกรณีที่ฟองอากาศเข้าสู่การไล่ระดับความดันผิวด้านนอกของฟองอากาศจะถูกผลักเข้าด้านใน ซึ่งทำให้เห็นรายละเอียดของฟองอากาศปรากฏขึ้นเหมือนลิมดิ่งนั้นการยุบตัวของฟองอากาศจะเกิดที่ผิวด้านนอกและล่มสลายไปดังแสดงในรูปที่ 2.8 และ 2.9

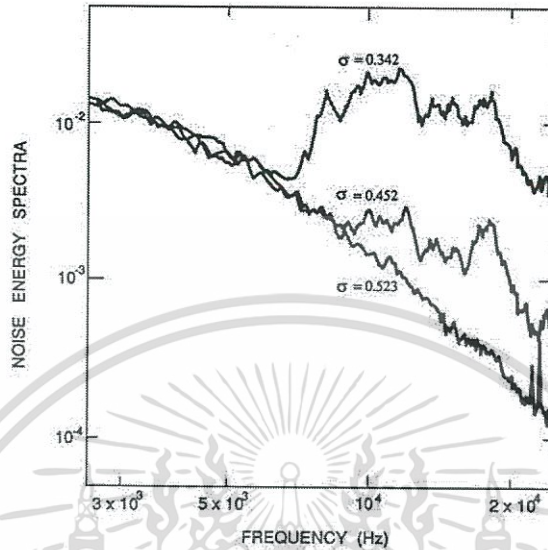
นอกจากการสังเกตการเกิดควิเทชันด้วยตาแล้วยังสามารถที่จะฟังจากเสียงได้โดยเสียงที่ได้ยินจะเหมือนกับมีก้อนกรวดไหลกระทบกับผนังของของแข็งซึ่งเราจำเป็นต้องลดความเสียหายและเสียงที่เกิดเหล่านั้นซึ่งจะกล่าวถึงในเรื่องถัดไป

### 2.2.6 เสียงที่เกิดจากควิเทชัน

ความรุนแรงและความหายนะจากการแตกของฟองอากาศผลลัพธ์ของมันทำให้เกิดเสียง ซึ่งเป็นผลมาจากแรงดันที่มากชั่วขณะที่เกิดขึ้นเมื่อฟองอากาศถูกบีบอัดอย่างสูงโดยพิจารณาการไหลของของเหลวที่เกิดจากปริมาตรที่เพิ่มขึ้นหรือการยุบตัวของโพรง ในด้านกลศาสตร์ไหลจะเข้าไปใกล้กับแหล่งที่มาที่เรียบง่ายและเป็นที่ชัดเจน โดยที่ความดันจะถูกคำนวณด้วยพจน์แรกของฟังก์ชันของสมการ พจน์ของแรงเฉื่อยที่ไม่คงที่ เนื่องจากมันจะสลายตัวอย่างช้าๆด้วยรัศมี มากกว่าพจน์ที่สองของสมการ ถ้าเราแสดงถึงปริมาตรที่แปรผันตามเวลาของโพรงอากาศด้วยความเร็วมันแสดงให้เห็นว่าองค์ประกอบความแปรปรวนของเวลาในด้านไกลถูกกำหนดโดย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$p_a = \frac{\rho L}{4\pi R} \frac{d^2V}{dt^2} \quad (2.6)$$



รูปที่ 2.10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสเปกตรัมพลังงานเสียงและความถี่

สเปกตรัมพลังงานเสียงจากการทำงานของวาล์วแบบหมุนภายใต้ การไม่เกิดฟองอากาศ  $\sigma = 0.523$  และ การเกิดฟองอากาศ  $\sigma = 0.452$  and  $(0.342$  ภายใต้เงื่อนไข) จากการสันนิษฐานของ Martin et al.

เมื่อ  $p_a$  คือ ความดันเกี่ยวกับเสียงที่แผ่ออกมา และเราใช้แสดงระยะทาง  $r$  จากศูนย์กลางโพรง ไปยังจุดที่วัด  $R$  เนื่องจากเสียงเป็นสัดส่วนโดยตรงกับอนุพันธ์อันดับสองของปริมาตรในแง่ของเวลาจึงเป็นที่แน่ชัดว่าคลื่นเสียงที่เกิดจากการแตกของฟองอากาศเกิดขึ้นเนื่องจากค่าที่มากของ อนุพันธ์ความเร็ว เมื่อ ฟองอากาศใกล้เคียงกับขนาดที่เล็กที่สุด เป็นปกติที่จะนำเสนอระดับเสียงโดยใช้ความดันบรากที่สองหรือ ความดันเสียง  $p_s$  โดย

$$p_s^2 = \bar{p}_a^2 = \int_0^\infty G(f) df \quad (2.7)$$

และแสดงการกระจายตัวของช่วงความถี่โดยสเปกตรัมความหนาแน่นของฟังก์ชัน  $G(f)$  ถึงนักวิจัยหรือวิศวกร เสียงแตกที่มาพร้อมกับการเกิดโพรงอากาศคือ 1 ในหลักฐานสำคัญที่เด่นชัดที่สุดของปรากฏการณ์. การทำความเข้าใจของฟองอากาศมักถูกพบก่อนด้วยเสียงรบกวนมากกว่าการสังเกตฟองอากาศ นอกจากนี้สำหรับวิศวกรภาคปฏิบัติมักใช้เป็นเครื่องมือหลักในการตรวจหาการเกิดโพรงอากาศในอุปกรณ์ต่างๆเช่นปั๊มและวาล์วอันที่จริงแล้ววิธีการทดลองหลายอย่างได้รับการแนะนำว่าประมาณอัตราความ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เสียหายของวัสดุโดยการวัดเสียงที่เกิดขึ้นเสียงรบกวนเนื่องจากการเกิดโพรงอากาศในปากทางเข้าของ วาล์วควบคุมไฮดรอลิกคือตัวอย่างและสเปกตรัมจากการทดลองดังกล่าวถูกนำเสนอในรูป 2.10

เส้นโค้งต่ำสุดที่  $\sigma=0.523$  แสดงถึงเสียงที่ปั่นป่วนจากการไหลจากการไม่เกิดโพรงอากาศ ด้านล่างของการเริ่มเกิดโพรง อากาศ(ประมาณ 0.523 ในกรณีนี้) มีการเพิ่มระดับเสียงอย่างมากที่ความถี่ ประมาณ 5 กิโลเฮิท ช่วงสเปกตรัมระหว่าง 5 กิโลเฮิท ถึง 10 กิโลเฮิท สอดคล้องกับความถี่ธรรมชาติที่ ความว่าจะได้บ่อเกิดที่มีอยู่ในการไหล

ส่วนใหญ่ของการวิเคราะห์วิธีการสร้างเสียงของโพรงอากาศสร้างความรู้เกี่ยวกับการเปลี่ยนแปลงของการ แยกของฟองอากาศฟองเดียว การวิเคราะห์ฟูรีเยร์ของความดันเสียงที่แผ่กระจายจากฟองเดียวเป็นครั้งแรก โดย Rayleigh และดำเนินการโดย Mellen และ Fitzpatrick และ Strasberg ในการพิจารณาการ วิเคราะห์ฟูรีเยร์นั้นจะสะดวกเมื่อทำให้ความถี่เป็นตัวแปรไร้มิติโดยช่วงเวลาทั่วไปของเหตุการณ์ทั้งหมด หรือเทียบเท่าโดยเวลาแตกของฟอง  $t_{tc}$  หาได้จากสมการ

$$t_{tc} = 0.915 \left( \frac{\rho_L R_0^2}{p_{\infty}^* - p_V} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (2.8)$$

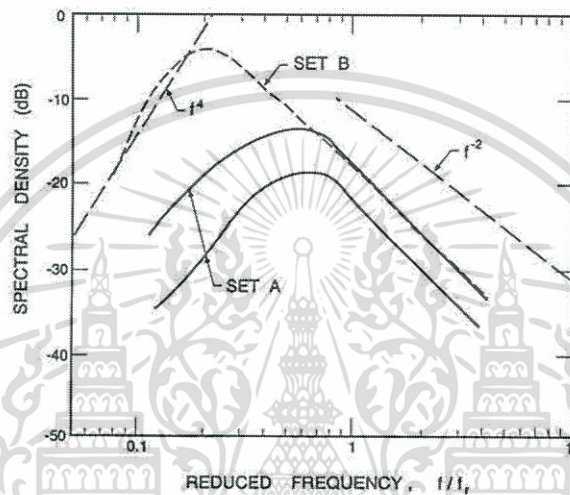
พิจารณาตัวความถี่ของ(Gf)โดยใช้ความถี่แบบไร้มิติ  $ft_{tc}$  เนื่องจากปริมาณของฟองเพิ่มขึ้นจาก ศูนย์เป็นมีค่าจำกัดแล้วจึงกลับไปเป็นศูนย์เป็นไปตามที่  $ft_{tc} > 1$  การแปลงฟูรีเยร์ของปริมาตรนั้นไม่ขึ้นอยู่กับความถี่ ดังนั้นอนุพันธ์ความเร็วจะเป็นสัดส่วนกับ  $f^2$  ดังนั้น  $G(f) \propto f^4$  นี่เป็นที่มาของกราฟด้ายซ้ายมือ ในรูปที่ 2.10 พฤติกรรมที่ความถี่ปานกลางที่  $ft_{tc} < 1$  เป็นเรื่องของความคิดและการถกเถียงกันมากขึ้น Mellen (1954) และคนอื่นๆ ได้พิจารณาสมการทั่วไปของการแตกตัวของฟองทรงกลมในกรณีที่ไม่ มีผลกระทบด้านความร้อนและก๊าซที่ไม่สามารถควบแน่นได้และสรุปได้ว่าเนื่องจากความเร็ว  $\frac{dR}{dt} \propto R^{-\frac{3}{2}}$  เป็นไปตาม  $R \propto t^{\frac{2}{5}}$  ดังนั้นการแปลงฟูรีเยร์ของอนุพันธ์ความเร็วจะนำไปสู่การประพจน์ตัวระยะไกล  $G(f) \propto f^{-\frac{2}{5}}$  ข้อผิดพลาดในการวิเคราะห์นี้คือการละเลยก๊าซที่ไม่สามารถควบแน่นได้เมื่อถูกรวมและเมื่อ การแตกตัวมีความก้าวหน้าเพียงพอ พจน์สุดท้ายในวงเล็บของสมการข้างต้นจะเทียบเคียงกับข้อกำหนด ก่อนหน้าใดจากนั้นพฤติกรรมจะค่อยข้างแตกต่างจาก  $R \propto t^{\frac{2}{5}}$

นอกจากนี้ค่าของอนุพันธ์ความเร็วมีค่ามากในช่วงการตอบสนองนี้และดังนั้นความถี่ของเฟสการ พั่นตัวจะมีอิทธิพลต่อสเปกตรัม ดังนั้นจึงไม่น่าแปลกใจที่  $f^{-\frac{2}{5}}$  ไม่พบในทางปฏิบัติ แต่ผลการทดลองส่วนใหญ่ดูเหมือนจะมีพฤติกรรมที่ความถี่ปานกลางเช่น  $f^{-1}$  หรือ  $f^{-2}$  Jorgensen (1961) ได้ทำการวัดความ ดังของเสียงที่จมอยู่ใต้น้ำจากเครื่องบินไอพ่นลำตัวและพบพฤติกรรมเหมือน  $f^{-2}$  ที่ความถี่สูง (ตั้งรูป 2.1)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อย่างไรก็ตามข้อมูลส่วนใหญ่ที่ทดลองสำหรับตัวโพรงอากาศหรือปีกที่ติดกับข้างเรือมีการสลายตัวที่อ่อนแอกว่า

ข้อมูลจาก Arakeri และ Shangumanathan (1985) จากการทดลองรูปทรงโพรงอากาศมีแนวโน้ม  $f^{-1}$  ที่สอดคล้องกันมากในเกือบทุกช่วงความถี่และ Ceccio และ Brennen (1991) ได้รับผลลัพธ์ที่คล้ายคลึงกันมาก



รูปที่ 2.11 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นของสเปกตรัมและความถี่ที่ลดลง

สเปกตรัมพลังงานอะคูสติกของเสียงจากเครื่องบินไอพ่นลำตัว แสดงให้เห็นถึงเส้นตรงผ่านชุดข้อมูลที่สร้างขึ้นโดย Blake และ Sevik (1982) จากข้อมูลโดย Jorgensen (1961) นอกจากนี้ยังมีการระบุการประพติตัวระยะไกล นอกจากนี้ความถี่ในการอ้างอิง  $f_r$  คือ

$$f_r = \left( \frac{p_\infty}{\rho_L d^2} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (2.9)$$

โดยที่  $d$  คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของเจ็ท

Ceccio และ Brennen (1991) ได้บันทึกเสียงจากฟองอากาศในการไหล สัญญาณอะคูสติกทั่วไปจากการทดลองของพวกเขาจะถูกทำซ้ำในรูป 2.12 คลื่นบวกรูปใหญ่ที่ประมาณ  $450 \mu\text{s}$  จะสอดคล้องกับการแตกตัวครั้งแรกของฟองอากาศ คลื่นแรกในรูปที่ 2.12 ตามด้วยการสั่นสะเทือนที่ขึ้นกับความคล่องแคล่วบางส่วนและคลื่นที่สองที่ประมาณ  $1100 \mu\text{s}$  ซึ่งสอดคล้องกับการแตกตัวครั้งที่สองที่เกิดขึ้นตามการฟื้นตัวจากการแตกตัวครั้งแรก

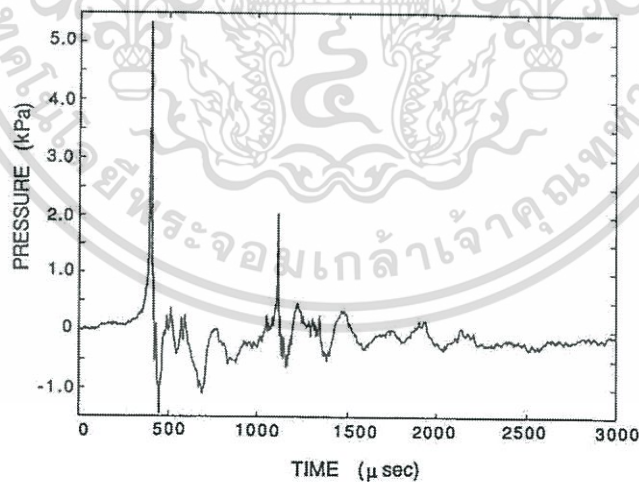
การวัดขนาดของคลื่นการแตกตัวที่ดีคือแรงกระตุ้นอะคูสติก / กำหนดให้เป็นพื้นที่ใต้คลื่นหรือ

$$I = \int_{t_1}^{t_2} p_a dt \quad (2.10)$$

เมื่อ  $t_1$  และ  $t_2$  คือเวลาก่อนและหลังคลื่นที่  $p_a$  เป็นศูนย์ สำหรับวัตถุประสงคฺ์ในภายหลังเราจึงกำหนดแรงกระตุ้นไร้มิติ  $I^*$  โดย

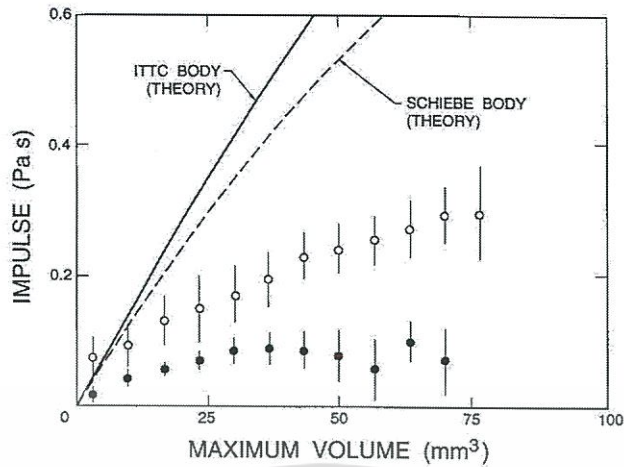
$$I^* = \frac{4\pi IR}{\rho_L U^2} \quad (2.11)$$

เมื่อ  $U$  และ  $L$  คือความเร็วและความยาวในการไหล แรงกระตุ้นอะคูสติกเฉลี่ยสำหรับการแตกตัวของฟองอากาศบนแกนสมมาตรทั้งสองรูปแบบ (ITTC และ Schiebe) จะถูกนำมาเปรียบเทียบในรูปที่ 2.1.2 ด้วยแรงกระตุ้นที่คาดการณ์ไว้จากการอินทิเกรตสมการ Rayleigh-Plesset



รูปที่ 2.12 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันและเวลา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.13 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระตุ้นและปริมาตรสูงสุด

การเปรียบเทียบแรงกระตุ้นอะคูสติก / ที่เกิดจากการแตกตัวของฟองอากาศเดี่ยวบนแกนสมมาตรทั้งสองรูปแบบที่เป็นปริมาตรสูงสูงก่อนที่จะแตกตัว สัญลักษณ์เปิด: ข้อมูลเฉลี่ยสำหรับรูปทรงของ Schiebe ; สัญลักษณ์ปิด : รูปทรงของ ITTC เส้นแนวตั้งแสดงค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานและยังแสดงให้เห็นว่าเป็นผลลัพธ์ที่สอดคล้องกันจากการแก้สมการ Rayleigh-Plesset จาก Ceccio และ Brennen (1991)

เนื่องจากการคำนวณทางทฤษฎีเหล่านี้สมมติว่าฟองอากาศยังคงเป็นทรงกลมความแตกต่างระหว่างทฤษฎีกับการทดลองจึงไม่น่าแปลกใจ การตีความอย่างหนึ่งในรูปที่ 2.13 คือทฤษฎีที่สามารถกำหนดลำดับความสำคัญของการประมาณค่าและขอบเขตบนของเสียงที่เกิดจากฟองเดี่ยว ในความเป็นจริงนั้นการเคลื่อนที่ของทรงกลมนั้นจะทำการลดแรงที่เกิดจากการแตกและลดเสียงที่เกิดขึ้นด้วย

ขั้นตอนต่อไปคือการพิจารณาการสังเคราะห์เสียงรบกวนของการเกิดโพรงอากาศจากเสียงรบกวนที่เกิดจากฟองอากาศหรือเหตุการณ์ต่างๆของการเกิดโพรงอากาศ ถ้าแรงกระตุ้นที่เกิดขึ้นจากแต่ละเหตุการณ์จะแสดงด้วย / และจำนวนครั้งต่อหน่วยเวลาจะแสดงด้วย  $n$  ระดับความดันเสียง  $p_s$  ซึ่งจะได้จาก

$$p_s = I \dot{n} \quad (2.12)$$

พิจารณาผลการทดลองและการวิเคราะห์ตามสมการ Rayleigh-Plesset แสดงให้เห็นว่าแรงกระตุ้นไร้มิติที่สร้างออกมาโดยเกิดจากเหตุการณ์การเกิดโพรงอากาศมีความสัมพันธ์อย่างมากกับปริมาตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สูงของฟองอากาศก่อนการแตกและเกือบจะเป็นตัวแปรอิสระของการไหลอื่นๆ จากสมการที่ 2.6 และ 2.8 ที่

$$I^* = \frac{1}{Ul^2} \left\{ \left( \frac{dV}{dt} \right)_{t_2} - \left( \frac{dV}{dt} \right)_{t_1} \right\} \quad (2.13)$$

และค่าของ  $dV/dt$  ในช่วงเวลา  $t = t_1, t_2$  เมื่อ  $d^2V/dt^2 = 0$  สามารถหาได้จากสมการ Rayleigh-Plesset ถ้ารัศมีของฟองที่เวลา  $t_1$  แทนด้วย  $R_x$  และค่าสัมประสิทธิ์ของความดันในของเหลวในขณะนั้นจะแทนด้วย  $C_{px}$  โดย

$$I^* \approx 8\pi \left( \frac{R_x}{l} \right)^2 (C_{px} - \sigma)^{\frac{1}{2}} \quad (2.14)$$

สมการเชิงตัวเลขของสมการ Rayleigh-Plesset สำหรับช่วงของสภาวะปกติ  $R_x/R_m \approx 0.62$  โดยที่  $R_m$  เป็นรัศมีที่ปริมาตรสูงสุด และ)  $C_{px} - \sigma \propto R_m/l$  ดังนั้น

$$I^* \approx \beta \left( \frac{R_m}{l} \right)^{\frac{5}{2}} \quad (2.15)$$

การผนวกรวมดังกล่าวของสมการ Rayleigh-Plesset ได้ให้ตัวประกอบของสัดส่วน  $\beta$  อยู่ที่ประมาณ 35 นอกจากนี้ขอบเขตด้านบนของข้อมูลการทดลองในรูปที่ 2.13 เป็นตัวอย่างที่ดูเหมือนจะสอดคล้องกับค่าของ  $\beta \approx 4$

เราสังเกตว่าความสัมพันธ์ระหว่าง  $I^*$  กับ  $\frac{R_m}{l}$  โผล่ออกมาจากการวิเคราะห์โดย Esipov และ Naugol'nykh (1973) ของคลื่นเสียงอัดที่เกิดจากการแตกตัวของฟองก๊าซในของเหลวแบบอัดตัวได้จากความสัมพันธ์ข้างต้นเป็นไปตามที่

$$I \approx \frac{\beta}{12} \rho_L U R_m^{\frac{5}{2}} / R l^{\frac{1}{2}} \quad (2.16)$$

ดังนั้นการประเมินผลของแรงกระตุ้นจากเหตุการณ์นั้นถูกทำให้สมบูรณ์โดยการประมาณค่าของ  $R_m$  เช่นในสมการ 2.3 เนื่องจากการประมาณดังกล่าวมี  $R_m$  เป็นตัวแปรอิสระจาก  $U$  สำหรับหมายเลขการเกิดโพรงอากาศที่กำหนด ดังนั้นจึงเป็นไปตามเส้นตรงกับ  $U$

อัตราการเกิดเหตุการณ์  $n$  อาจมีความซับซ้อนมากในการประเมินมากกว่าที่คิด ถ้าทุกนิวเคลียสไหลผ่านบางอย่างในลำการไหล มีพื้นที่หน้าตัด  $A_n$  ในด้านหน้าของการไหลจะเกิดโพรงที่คล้ายกันและผลจะเป็นไปตาม

$$\dot{n} = nA_n U \quad (2.17)$$

โดยที่  $n$  คือความเข้มข้นของนิวเคลียส(จำนวนหน่วย / ปริมาตร)ในกระแสที่ไหลเข้ามาจากนั้นค่าความเค้นอะคูสติคที่เกิดจากการแทนสมการ 2.14,2.15 ลงในสมการ 2.10 และใช้สมการ 2.3 จะกลายเป็น

$$p_s \approx \frac{\beta}{3} \rho_L U^2 A_n n l^2 (-\sigma - C_{pmin})^{\frac{5}{2}} / R \quad (2.18)$$

โดยที่เราได้ละเว้นบางส่วนของค่าคงที่ของกำลังของตัวแปร สำหรับสมการทั่วไปที่มีความสัมพันธ์นำมาพิจารณา สมการ 2.16 จะให้ระดับความดันของเสียงที่มีขนาดเท่ากับ  $U^2$  และมีค่าเป็นเท่าตัวเนื่องจาก  $A_n \propto l^2$  การปรับขนาดด้วยความเร็วนี้จะสอดคล้องกับการสังเกตบางอย่างที่เกิดขึ้นกับการเคลื่อนที่ของฟองอากาศ ตัวอย่างเช่น Blake, Wolpert และ Geib (1977) และ Arakeri และ Shanguanathan (1985) ก่อนหน้านั้นสังเกตว่า  $p_s \propto U^m$  โดยที่  $m = 1.5$  ถึง 2

กฎการปรับขนาดที่แตกต่างกันจะใช้เมื่อโพรงอากาศเกิดขึ้นโดยความผันผวนและปั่นป่วนอย่างเช่นในเครื่องบินไอพ่นลำตัว(ดูตัวอย่าง Ooi 1985 และ Franklin และ McMillan 1984)จากนั้นความตึงเครียดทั่วไปที่เกิดจากนิวเคลียสขณะเคลื่อนที่ไปตามการไหลแบบปั่นป่วนซึ่งเป็นเรื่องยากมากที่จะประมาณ ดังนั้นรูปแบบสำหรับความดันเสียงเนื่องจากการเกิดโพรงอากาศในการไหลแบบปั่นป่วนและการปรับขนาดของเสียงที่มีความเร็วไม่เข้าใจกันดีพอ

## 2.2.7 การเรืองแสงของโพรงอากาศ

แม้ว่าจะมีทั้งแบบชั่วคราวและเชิงพื้นที่ อุณหภูมิและความดันที่สูงมากที่อาจเกิดขึ้นในก๊าซที่ไม่สามารถควบแน่นได้ระหว่างการแตกเป็นที่เชื่อว่าเป็นเหตุผลของการเกิดปรากฏการณ์เรืองแสง การแผ่รังสีของแสงที่เกิดขึ้นระหว่างการแตกของฟองอากาศ ปรากฏการณ์นี้ถูกสังเกตครั้งแรกโดย Marinenco และ Trillat และมีคำอธิบายที่แตกต่างกันออกไปเพื่ออธิบายถึงการปล่อยมลพิษ ความจริงที่ว่าแสงถูกปล่อยออกมาจากการแตกถูกสาธิตครั้งแรกโดย Meyer และ Kuttruff พวกเขาสังเกตเห็นถึงการเกิดโพรงอากาศบนแกนสั้นของวัสดุแมกนีโตสตริกทีฟและค่าสหสัมพันธ์ของแสงกับจุดการแตกในวงจรของการเติบโตและการแตก ความสมดุลของหลักฐานในตอนนีดูเหมือนจะยืนยันข้อเสนอแนะจาก Noltingk และ Neppiras ปรากฏการณ์นี้เกิดจากการบีบอัดและการทำความร้อนแบบอะเดียแบติกของก๊าซที่ไม่สามารถควบแน่นได้ในการแตกตัวของฟองอากาศดังที่เราได้กล่าวไว้ในส่วนก่อนหน้า นี้ อุณหภูมิของเหตุการณ์ที่ 6000K สามารถคาดการณ์ได้จากการอัดตัวของก๊าซที่ไม่สามารถควบแน่นได้ การคำนวณแบบเดียวกันนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชี้ให้เห็นว่าอุณหภูมิที่สูงเหล่านี้จะมีอายุเพียงเสี้ยวของไมโครวินาที เงื่อนไขดังกล่าวจะอธิบายถึงการแผ่กระจายของแสง แท้จริงแล้วการวัดสเปกตรัมของการเกิดการส่องสว่างของแสงโดย Taylor และ Jarman, Flint and Suslick และคนอื่นๆแนะนำอุณหภูมิที่ประมาณ K 5000 อย่างไรก็ตามการทดลองล่าสุดของ Barber and Putterman บ่งชี้ว่าอุณหภูมิสูงกว่าและระยะเวลาการปล่อยก๊าซที่สั้นลงกว่าพิกโครวินาที ข้อเสนอแนะเกี่ยวกับข้อสังเกตเหล่านี้ชี้ให้เห็นถึงข้อเสนอแนะของ Jarman (1960) ว่าการแตกของฟองอากาศก่อตัวเป็นรูปทรงกลมและเกิดการกระแทกด้านในในเนื้อก๊าซของฟองอากาศและการโฟกัสการกระแทกที่ศูนย์กลางของฟองอากาศเป็นเหตุผลสำคัญสำหรับอุณหภูมิที่สูงมากที่เกี่ยวข้องกับการแผ่รังสีซินโครตรอนเนสเซนส์ อย่างไรก็ตามมันเป็นสิ่งสำคัญที่จะสังเกตเห็นว่าเป็นทรงกลมสมมาตรซึ่งเป็นสิ่งที่จำเป็นมากสำหรับกลไกนี้จะมีผลกระทบสำคัญ ดังนั้นจึงคาดว่า การบิดเบือนที่เกิดจากการไหลไม่สังเกตการกระแทกเป็นสำคัญและถึงแม้จะลดประสิทธิภาพของกลไกการบีบอัดขั้นพื้นฐาน

## 2.2.8 การเกิดควิวเทชันบนกังหันน้ำ

กังหันน้ำที่ใช้งานในปัจจุบันนี้มีประสิทธิภาพที่ลดลงภายในเวลาไม่กี่ปีเนื่องจากปัญหาต่างๆโดยปัญหาหลักนั้นได้แก่การเกิดควิวเทชัน โดยควิวเทชันนั้นจะทำให้เกิดหลุมบ่อบนพื้นของกังหันเนื่องจากการก่อตัวของฟองอากาศ โดยส่วนมากจะเกิดที่ทางออกของใบพัด ศาสตราจารย์ D.Thoma ได้เสนอตัวแปรไร้มิติที่เรียกว่า Cavitation factor ( $\sigma$ ) ซึ่งใช้กับกังหันน้ำปฏิกิริยาชนิดต่างๆเพื่อหาบริเวณที่เกิดควิวเทชันขึ้นโดยมีสมการดังนี้

$$\sigma = \frac{H_a - H_v - H_s}{H} \quad (2.19)$$

โดยที่	$H_a$	คือ	เฮดของความดันบรรยากาศ เมตร
	$H_v$	คือ	เฮดของความดันไออิ่มตัวของน้ำ เมตร
	$H_s$	คือ	ระดับจากใบพัดถึงระดับท้ายน้ำ เมตร
	$H$	คือ	เฮดสุทธิบนเทอไบน์ เมตร

โดยจะนำค่า ควิวเทชันแฟคเตอร์ (Cavitation factor) ไปเปรียบเทียบกับ ควิวเทชันวิกฤต (Critical Cavitation factor ( $\sigma_c$ )) ซึ่งขึ้นอยู่กับความเร็วเฉพาะของใบพัด ( $N_s$ ) ของแต่ละกังหันซึ่งมีสมการต่างๆดังนี้

กังหันน้ำ ฟรานซิส

$$\sigma_c = 0.625 \left( \frac{N_s}{380.78} \right)^2 \quad (2.20)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กังหันน้ำ พรอบเพอเรือ

$$\sigma_c = 0.28 + \frac{1}{7.5} \left( \frac{N_s}{380.78} \right)^3 \quad (2.21)$$

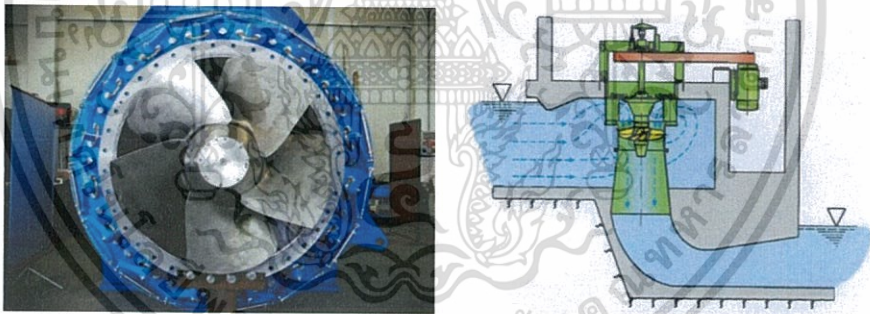
และกังหันน้ำแคปแลน ซึ่งจะมีค่า คาวีเทชันวิกฤต ( $\sigma_c$ ) มากกว่ากังหันน้ำ 10 % โดยถ้า  $\sigma_c > \sigma$  จะก่อให้เกิดคาวีเทชัน

## 2.3 กังหัน

กังหัน (Turbines) คือ เครื่องจักรกลหมุนที่ดูดซับพลังงานจากของไหล (ซึ่งส่วนใหญ่จะเป็นน้ำ ไอน้ำ และ แก๊ส) โดยการเปลี่ยนพลังงานของไหลมาเป็นงานเชิงกล (mechanical work)

### 2.3.1 กังหันน้ำแคปแลน (Kaplan turbine)

เป็นกังหันน้ำที่มีลักษณะเหมือนใบพัดดังแสดงในภาพที่ 2.16 เหมาะกับแหล่งน้ำที่มีระดับความสูงของผิวน้ำต่ำตั้งแต่ 1 ถึง 70 เมตร และมีหลักการทำโดยให้น้ำไหลผ่านใบพัดในทิศทางขนานกับแกนของกังหันน้ำ โดยใบพัดของกังหันน้ำแคปแลนสามารถปรับมุมเพื่อรับแรงอัดหรือแรงฉุดน้ำโดยอัตโนมัติซึ่งจะทำให้สามารถควบคุมความเร็วในการหมุนของกังหันได้



รูปที่ 2.14 แสดงลักษณะเครื่องกังหันน้ำแบบแคปแลน

## 2.4 ชนิดการไหลของของไหล

ชนิดการไหลของของไหลมีการแบ่งอยู่หลายลักษณะ ดังต่อไปนี้

2.4.1 การไหลแบบคงตัว (Steady Flow) เป็นการไหลซึ่งความเร็วของของไหลไม่มีการเปลี่ยนแปลงไปตามเวลาแต่อาจเปลี่ยนแปลงได้ทุกๆหน้าตัดของการไหล

2.4.2 การไหลแบบไม่คงตัว (Unsteady Flow) การไหลจะไม่คงตัวก็ต่อเมื่อคุณลักษณะของของไหลตัวใดตัวหนึ่งหรือทั้งหมดขณะที่เกิดการเคลื่อนที่มีการเปลี่ยนแปลงไปตามเวลาที่จุดต่างๆในของไหล การไหลแบบนี้จึงเป็นการไหลของของไหลที่ผ่านท่อในอัตราที่ไม่คงที่

2.4.3 การไหลแบบเอกภาพ (Uniform Flow) เป็นการไหลของของไหลซึ่งขนาดและทิศทางของความเร็วของของไหลมีค่าเท่ากันทุกๆหน้าตัดของการไหล

2.4.4 การไหลแบบอเนกภาพ (Non-uniform Flow) เป็นการไหลของของไหลที่มีความเร็ว ความดัน เปลี่ยนแปลงไปทุกๆหน้าตัดของการไหล

2.4.5 การไหลแบบราบเรียบ (Laminar Flow) การไหลแบบราบเรียบนั้นจะมีลักษณะของการไหลมีรูปร่างเป็นชั้น (Laminar or Layers) ซึ่งมีความเร็วต่างกัน เรียงซ้อนกันอยู่เป็นชั้น เป็นการไหลโดยที่อนุภาคของของไหลเคลื่อนที่เป็นเส้นตรงขนานกันไปคล้ายๆกับการไหลเป็นชั้นๆ (Laminae) ความเร็วของของไหลในชั้นที่อยู่ใกล้ๆกันจะมีค่าไม่เท่ากัน แต่แตกต่างกันเพียงเล็กน้อย การไหลแบบราบเรียบจะเกิดจากความหนืดของของไหลที่ไหลเป็นไปตามกฎความหนืดของนิวตัน ความหนืดของของไหลเป็นสิ่งที่ส่งผลทำให้การไหลเปลี่ยนไปเป็นการไหลแบบปั่นป่วนได้

2.4.6 การไหลแบบปั่นป่วน (Turbulent) การไหลส่วนใหญ่จะเป็นแบบ Turbulent แทบทั้งหมด การไหลแบบปั่นป่วนมีลักษณะโครงสร้างของการไหลที่ไม่แน่นอน ความเร็วที่จุดใดๆนั้นจะมีค่าไม่คงที่ เป็นการไหลโดยที่อนุภาคของของไหลเคลื่อนที่ไปอย่างไม่เป็นระเบียบ ความเร็วของอนุภาคของของไหลแตกต่างกันทั้งขนาดทิศทาง

## 2.5 เลขเรย์โนลด์ (Reynolds Number)

เป็นจำนวนที่ไม่มีมิติ ซึ่งเป็นสัดส่วนของ ความเฉื่อยต่อความหนืด เลขเรย์โนลด์จะใช้ในการอธิบายการแบ่งลักษณะการไหลของของเหลวที่แตกต่างกัน คือการไหลแบบราบเรียบ(Laminar Flow) หรือการไหลแบบปั่นป่วน(Turbulent Flow)กรณีเรย์โนลด์ของการไหลมีค่าต่ำ แสดงว่าแรงหนืดนั้นมีอิทธิพลต่อการเคลื่อนที่ของของเหลว ทำให้การไหลของของเหลวมีลักษณะเป็นแบบราบเรียบ (Laminar)ถ้าเรย์โนลด์ของการไหลมีค่าสูง แสดงว่าแรงเฉื่อยนั้นมีอิทธิพลต่อการเคลื่อนที่ของของเหลว ทำให้การไหลเป็นแบบปั่นป่วน(Turbulent)และจะทำให้เกิดการหมุนแบบก้นหอย(Vortices)ซึ่งจะทำให้การไหลนั้นเกิดความไม่เสถียร ค่าเรย์โนลด์จะมีค่าขึ้นอยู่กับความเร็วของการไหล ความหนืด ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางท่อ และความหนาแน่นของของไหล สามารถเขียนความสัมพันธ์ได้เป็น

$$RE = \frac{\rho V D}{\mu} \quad (2.22)$$

โดยที่  $\rho$  คือ ความหนาแน่นของของไหล กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร

$V$  คือ ความเร็วในการไหล เมตรต่อวินาที

$D$  คือ เส้นผ่านศูนย์กลางภายในท่อ เมตร

$\mu$  คือ ความหนืดของของไหล กิโลกรัมต่อเมตรวินาที

เลขเรย์โนลด์ใช้เป็นตัวกำหนดรูปแบบของการไหลของของไหลว่าเป็นการไหลแบบใด เช่น

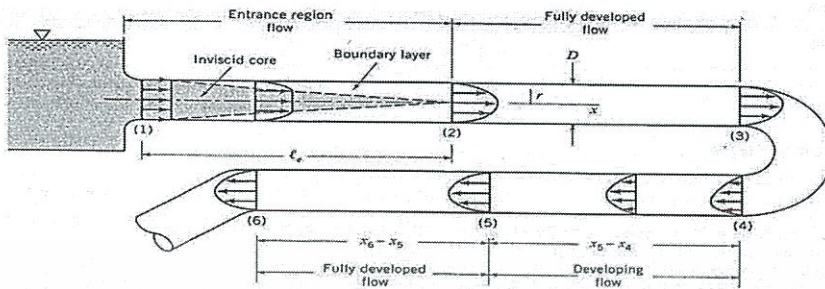
Re อยู่ในช่วง 0 – 2300 สภาพการไหลจะเป็นแบบ การไหลแบบราบเรียบ

Re อยู่ในช่วง 2300 - 4000 สภาพการไหลจะเป็นแบบ เขตที่มีการเปลี่ยนแปลง คือ มีการไหลทั้ง 2 แบบ รวมกัน

Re มากกว่า 4000 สภาพการไหลจะเป็นแบบ การไหลแบบปั่นป่วน

ในกรณีที่ของไหล ไหลเข้าท่อโดยเป็นการไหลเป็นแบบ การไหลสม่ำเสมอ ดังรูป เมื่อพิจารณาผลกระทบของความหนืดพบว่า ในกรณีของไหลหนืดนั้น จะเกิดผลกระทบที่เกิดจากแรงเฉือน ทำให้เกิดขึ้นของ ชั้นขอบเขต ขึ้น ทำให้การไหลในช่วงนี้จะมีการแบ่งออกเป็น 2 ส่วนกันอย่างชัดเจน เราเรียกระยะทางที่ของไหลไหลเข้าเป็นช่วง ระยะปากทางเข้า และหลังจากช่วงนี้ การไหลของของไหลจะ

เปลี่ยนเป็นแบบ การไหลแบบพัฒนาเต็มที่ ซึ่งการไหลในช่วงนี้ความเร็วจะไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงกับระยะทางตามแนวของการไหล ( $x$ )



รูปที่ 2.15 แสดงภาพของการไหลเข้าของของไหล

## 2.6 ระยะปากทางเข้า

ระยะปากทางเข้า (Fully developed flow) คือผลจากความหนืดของของไหลทำให้บริเวณปากทางเข้ามีการไหลที่ไม่เต็มท่อ จึงทำให้เกิดบริเวณการไหลชั้นขีดผิวภายในท่อ ขณะที่ของไหลไหลเข้าไปในท่อ ชั้นขีดผิวจะพัฒนาไปตามความยาวท่อและความหนาชั้นขีดผิวจะเพิ่มขึ้นจนกระทั่งถึงแนวเส้นศูนย์กลางของท่อ ระยะที่วัดจากปากทางเข้าท่อจนถึงจุดนี้เรียกว่า ระยะปากทางเข้า (Entrance Length,  $L_e$ ) ซึ่งถ้าของไหลนั้นเคลื่อนที่โดยบริเวณช่วงปากทางเข้านี้ของไหลจะไหลเต็มท่อ สำหรับระยะปากทางเข้า จะขึ้นอยู่กับอัตราส่วนระหว่างแรงเฉื่อยต่อแรงเนื่องจากความหนืด ( $Re$ ) โดยแยกออกเป็น

$$\frac{L_e}{D} = 0.06Re \quad \text{สำหรับการไหลแบบราบเรียบ} \quad (2.23)$$

$$\frac{L_e}{D} = 4.4Re^{1/6} \quad \text{สำหรับการไหลแบบปั่นป่วน} \quad (2.24)$$

## 2.7 สมการความต่อเนื่อง (The Equation of Continuity)

เป็นสมการที่ใช้ศึกษาการไหลของของไหลภายในท่อ การไหลของของไหลภายในท่อที่มีขนาดไม่สม่ำเสมอที่มีการไหลผ่านพื้นที่หน้าตัดที่ไม่เท่ากัน เนื่องจากของไหลไม่สามารถไหลผ่านผนังท่อและไม่มี การสร้างหรือทำลายของไหลในท่อ ดังนั้นมวลของของไหลที่ผ่านแต่ละส่วนของท่อการไหลในเวลาเดียวกันนั้นจึงมีค่าเท่ากัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\dot{m}_1 = \dot{m}_2 \quad (2.25)$$

$$\rho_1 A_1 v_1 = \rho_2 A_2 v_2 \quad (2.26)$$

โดยที่	$v_1, v_2$	คือ ความเร็วของของไหล เมตรต่อวินาที
	$\rho$	คือ ความหนาแน่นของของไหล กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร
	A	คือ พื้นที่หน้าตัดของท่อที่ตั้งฉากกับทิศทางของการไหล ตารางเมตร

## 2.8 สมการพลังงาน (Energy's Equation)

สมการพลังงานจะนำไปใช้คำนวณกับการไหลของไหลเมื่อของไหลมีการเคลื่อนที่ที่เกิดขึ้นจะมีการเกิดพลังงาน เช่น พลังงานศักย์ พลังงานจลน์ และพลังงานภายในที่มีการเปลี่ยนแปลง การวิเคราะห์ปัญหาของของไหลที่เกิดการเคลื่อนที่สามารถใช้หลักการต่างๆในการแก้ปัญหา

1. หลักการของการอนุรักษ์มวล (Principle of Conservation of Mass)
2. หลักการของการอนุรักษ์พลังงาน (Principle of Conservation of Energy)
3. หลักการของการอนุรักษ์โมเมนตัม (Principle of Conservation of Momentum)

## 2.9 สมการเบอร์นูลลี (Bernoulli's Equation)

สมการเบอร์นูลลี(Bernoulli's Equation)คือสมการพลังงานกลสำหรับการไหลไปตามเส้นกระแสซึ่งบอกถึงความสัมพันธ์ระหว่างเฮดความดัน เฮดความเร็ว และเฮดระดับความสูง ณ ตำแหน่งใดๆภายในท่อที่มีของไหลผ่าน มีค่าคงตัวเสมอ และอยู่ภายใต้สมมติฐานดังต่อไปนี้

1. เป็นการไหลในสภาวะคงตัว
2. เป็นการไหลยุบตัวไม่ได้
3. ไม่คำนึงถึงผลของความหนืด จึงไม่คิดผลจากแรงเสียดทาน
4. ของไหลมีความเร็วสม่ำเสมอตลอดหน้าตัดการไหล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\frac{P_1}{\rho g} + \frac{v_1^2}{2g} + h_1 = \frac{P_2}{\rho g} + \frac{v_2^2}{2g} + h_2 + h_{loss} \quad (2.27)$$

## 2.10 ค่าการสูญเสียหลักและการสูญเสียรองสำหรับการไหลภายในท่อ

เมื่อของไหลไหลภายในท่อจะเกิดการต้านทานของการไหลเกิดขึ้นเสมอ ดังนั้นจึงทำให้เกิดการสูญเสียพลังงานของของไหลขึ้น ซึ่งการสูญเสียนี้สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 แบบ คือ การสูญเสียหลัก (Major Loss) และการสูญเสียรอง (Minor Loss)

2.10.1 การสูญเสียหลัก (Major Loss) คือการสูญเสียเนื่องมาจากแรงเสียดทานที่เกิดขึ้นภายในท่อเมื่อมีของไหลไหลผ่าน ซึ่งสามารถคำนวณได้โดยใช้สมการ Williams-Hazen formula หรือ Darcy-Weisbach Equation สาเหตุที่จัดให้การสูญเสียที่เกิดจากแรงเสียดทานในท่อเป็นการสูญเสียหลักนั้น เพราะในกรณีที่ท่อมีความยาวมาก ๆ การสูญเสียแบบนี้จะเกิดขึ้นมากเมื่อเทียบกับการสูญเสียด้วยเหตุผลอื่นๆ

$$\text{สมการของ ดาร์ซี วิสแบค } h = f \frac{L}{D} \frac{v^2}{2g} \quad (2.28)$$

โดยที่	$h$	คือ การสูญเสียหลัก เนื่องจากแรงเสียดทานภายในท่อ เมตร
	$L$	คือ ความยาวของท่อ เมตร
	$D$	คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อที่ของไหลไหลผ่าน เมตร
	$V$	คือ ความเร็วเฉลี่ยของการไหลของของไหล เมตรต่อวินาที
	$g$	คือ อัตราเร่งจากแรงโน้มถ่วง เมตรต่อวินาทีกำลังสอง
	$f_D$	คือ ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของ ดาร์ซี

2.10.2 การสูญเสียรอง (Minor Loss) คือ การสูญเสียเนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงความเร็วในการไหล ไม่ว่าจะเป็นขนาดหรือทิศทางการไหล หรืออาจกล่าวได้ว่าเป็นการสูญเสียพลังงานที่มีผลมาจากพลังงานจลน์ หรือเฮดความเร็วเปลี่ยนแปลงไปเมื่อของไหลไหลผ่านข้อต่อ ข้องอ ข้อเพิ่มหรือลดขนาด การไหลผ่านวาล์วต่างๆ เป็นต้น ในกรณีที่ท่อยาวมาก ๆ การสูญเสียรองนี้จะมีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับการสูญเสียหลักอันเนื่องมาจากแรงเสียดทานและการสูญเสียรองไม่ขึ้นอยู่กับความยาวของท่อ ซึ่งอาจจะไม่ต้องนำมาคิดการสูญเสียถ้าไม่มีการผ่านอุปกรณ์พิตติงต่างๆ ดังนั้นสมการที่ใช้ในการหาค่าการสูญเสียรองนั้นจึงอยู่ในรูปของเฮดความเร็ว และคูณด้วยค่าสัมประสิทธิ์ของการสูญเสีย เขียนเป็นสมการได้คือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$h = \sum K \frac{v^2}{2g} \tag{2.29}$$

เมื่อ k คือ สัมประสิทธิ์ของการสูญเสียซึ่งจะไม่ขึ้นอยู่กับลักษณะช่องทางที่ของไหลไหลผ่านซึ่งจะมีค่าต่างๆ

### 2.11 สัมประสิทธิ์ความฝืด

การหาสัมประสิทธิ์ความฝืดนั้นสามารถหาได้จากแผนภูมิของมูดี้ (Moody diagram) ดังแสดงในรูปที่ 2.16 โดยแกนตั้งด้านซ้ายมือจะแสดงค่าสัมประสิทธิ์ความฝืด ( f ) และแกนนอนแสดงค่า Reynolds number ส่วนแกนตั้งทางด้านขวาจะเป็นค่าความขรุขระสัมพัทธ์ของท่อ (Relation roughness) โดยมีสมการดังนี้

$$\text{ความขรุขระสัมพัทธ์} = \frac{e}{D} \tag{2.30}$$

โดย e เป็นค่าความขรุขระผิวท่อโดยเฉลี่ย

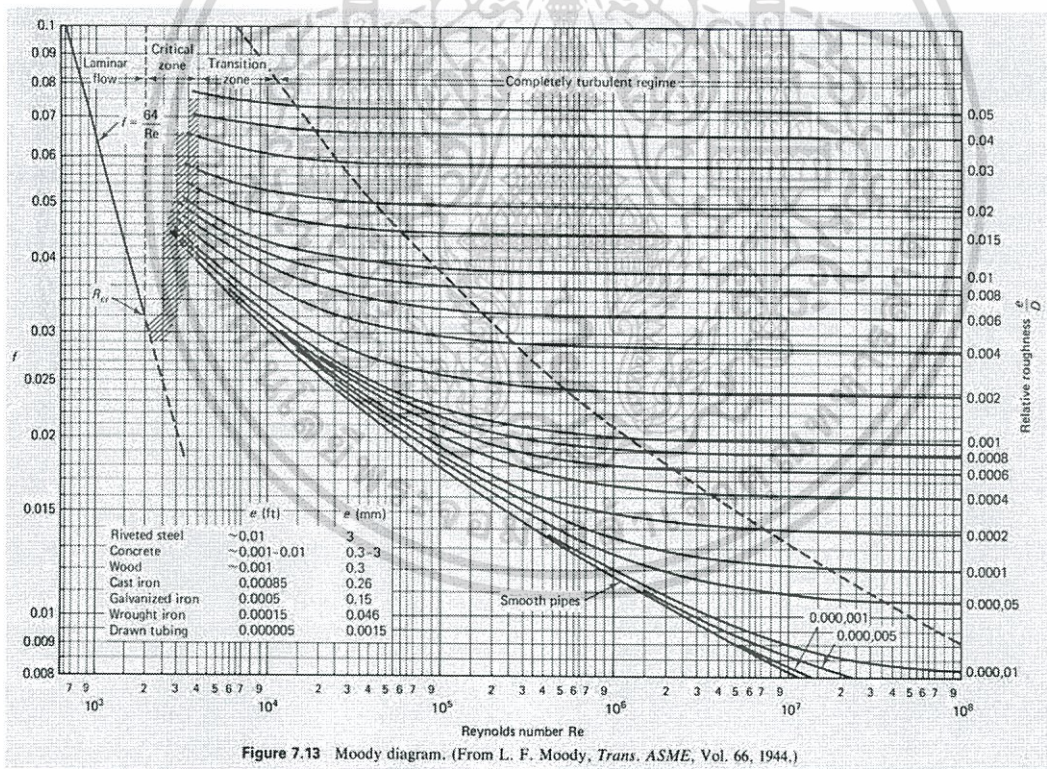


Figure 7.13 Moody diagram. (From L. F. Moody, *Trans. ASME*, Vol. 66, 1944.)

รูปที่ 2.16 แผนภูมิ Moody ( Moody Diagram)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าความขรุขระผิวท่อโดยเฉลี่ย ( $\epsilon$ ) ซึ่งมีผลต่อแรงเสียดทานกล่าวคือ หากโลหะที่ใช้ทำผิวท่อกมีความขรุขระมาก แรงเสียดทานที่ผิวก็ย่อมมากตามไปด้วยซึ่งจากสามัญสำนึกก็น่าจะเป็นความจริง ในการทดลองจะใช้เม็ดทรายไปติดอยู่ที่ผิวหลอดแก้วเพื่อเลียนแบบความขรุขระจริงของท่อ ขนาดของเม็ดทรายนี้สามารถกำหนดได้จากการร่อนด้วยตะแกรงที่รู้ขนาด จากนั้นวัดค่าความดันตกคร่อมของท่อจริงเทียบกับท่อที่เคลือบผิวด้วยเม็ดทรายขนาดต่างๆเมื่อได้ค่าความดันตกคร่อมเท่ากันก็แสดงว่าท่อจริงมีความขรุขระเฉลี่ยเท่ากับเม็ดทรายในหลอดแก้วเพราะความดันตกคร่อมจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับแรงเสียดทาน โดยสามารถหาค่าที่ว่าเป็นจากคู่มือวิศวกรต่างๆดังเช่น รูปที่ 2.17

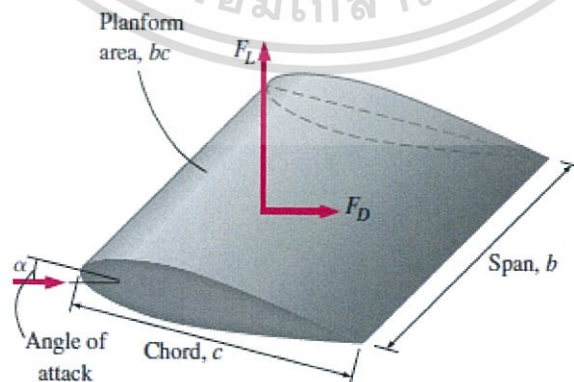
**Pipe Roughness**

Type of Pipe (New, clean condition)	Roughness $\epsilon$ (ft)	Roughness $\epsilon$ (in.)
Unlined Concrete	0.001–0.01	0.012–0.12
Cast Iron—Uncoated	0.00085	0.01
Galvanized Iron	0.0005	0.006
Carbon Steel	0.00015	0.0018
Fiberglass Epoxy	0.000025	0.0003
Drawn Tubing	0.000005	0.00006

รูปที่ 2.17 ค่าความขรุขระเฉลี่ยของวัสดุท่อชนิดต่างๆ

## 2.12 แรงยกและแรงฉุด

เมื่อพิจารณาของไหลที่ไหลผ่านแพนอากาศ (Airfoil) ของไหลด้านบนจะมีความเร็วมากกว่าความเร็วของของไหลด้านล่างแพนอากาศ ทำให้ความดันด้านบนน้อยกว่าความดันด้านล่างจึงเกิดแรงยก (Lift force,  $F_L$ ) กระทำต่อแพนอากาศ ในขณะที่เดียวกันก็จะมีแรงฉุด (Drag force,  $F_D$ ) ด้านการเคลื่อนที่ของแพนอากาศ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## รูปที่ 2.18 ภาพแสดงแรงยกและแรงดูด

แรงยกและแรงดูดสามารถคำนวณได้จากสมการด้านล่าง

$$F_L = 0.5\rho v^2 C_L A \quad (2.31)$$

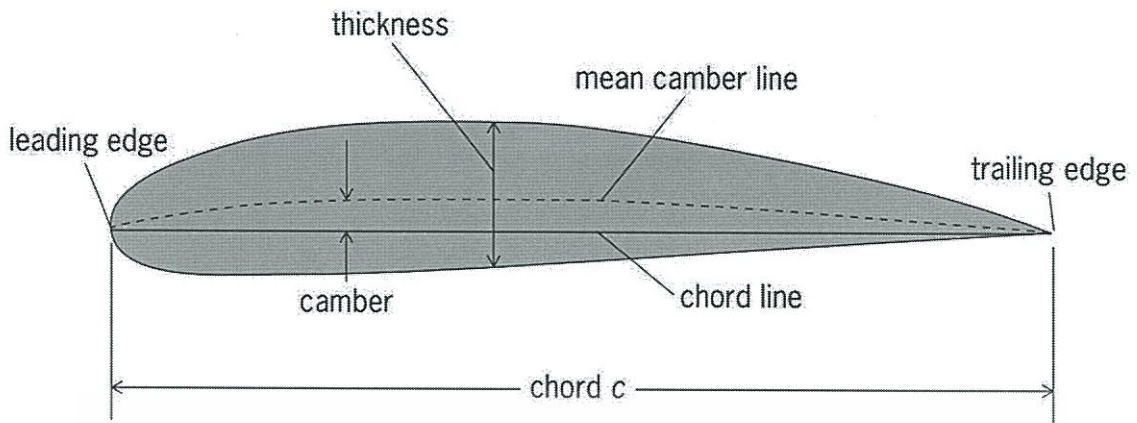
$$F_D = 0.5\rho v^2 C_D A \quad (2.32)$$

เมื่อ	$F_L$	คือ แรงยก นิวตัน
	$F_D$	คือ แรงดูด นิวตัน
	$C_L$	คือ สัมประสิทธิ์แรงยก นิวตันต่อตารางเมตร
	$C_D$	คือ สัมประสิทธิ์แรงดูด นิวตันต่อตารางเมตร
	$\rho$	คือ ความหนาแน่นของของไหล กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร
	$v$	คือ ความเร็วของของไหล เมตรต่อวินาที
	$A$	คือ พื้นที่ด้านหน้า Frontal area (กรณีแรงดูด) ตารางเมตร พื้นที่ขนานกับทิศทางการไหล Platform area (กรณีแรงยก) ตารางเมตร

## 2.13 แพนอากาศ

แพนอากาศ (Airfoil ในแบบอเมริกันหรือ Aerofoil ในแบบอังกฤษ) ออกแบบมาเป็นพิเศษ เพื่อให้แรงยกมีค่ามากกว่าแรงต้านมากมายนำไปใช้กับเครื่องบินที่ต้องการสร้างแรงจากอากาศที่ไหล เช่น เครื่องบิน และกังหันต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.19 แสดงส่วนประกอบของแพนอากาศ

1. ชายหน้า (leading edge) คือ จุดหน้าสุดของเส้นแคมเบอร์หรือแพนอากาศ
2. ชายหลัง (trailing edge) คือ จุดหลังสุดของเส้นแคมเบอร์หรือแพนอากาศ
3. คอร์ด (chord) คือ ระยะทางเป็นเส้นตรงจากชายหน้าปีก(leading edge) ไปยังชายหลังปีก ( trailing edge) ของแพนอากาศมักกำหนดด้วยสัญลักษณ์  $c$
4. เส้นคอร์ด (chord line) คือ เส้นตรงสมมุติที่ลากจากชายหน้าปีกไปยังชายหลังปีกของแพนอากาศ
5. เส้นแคมเบอร์ (mean camber line) หรือ เส้นกลางความโค้งตัว  
คือ เส้นสมมุติที่ลากแบ่งครึ่งผิวปีกบน และ ผิวปีกล่างของแพนอากาศ ออกเป็นสองส่วนเท่าๆกัน
6. ค่าแคมเบอร์ (camber) คือ ระยะห่างที่มากที่สุดระหว่างเส้นแคมเบอร์กับเส้นคอร์ด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.1 เปรียบเทียบคุณสมบัติของแพนอากาศนากา

หมวดหมู่	ข้อดี	ข้อเสีย
6 series	<ol style="list-style-type: none"> <li>ใช้งานได้ดีในที่มีความเร็วสูง</li> <li>ให้ค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านที่ต่ำในช่วงของการใช้งาน</li> <li>มีค่าสัมประสิทธิ์แรงยกสูงสุดสูง</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>มีความไวต่อพื้นผิวที่ขรุขระ</li> <li>มีค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านสูงเมื่ออยู่ในช่วงนอกของการใช้งาน</li> </ol>
7series	<ol style="list-style-type: none"> <li>เกิดโมเมนต์ต่ำที่จุดสูงสุดของแพนอากาศ</li> <li>ให้ค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านที่ต่ำในช่วงของการใช้งาน</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>ค่าสัมประสิทธิ์แรงยกสูงสุดต่ำ</li> <li>มีความไวต่อพื้นผิวขรุขระ</li> </ol>
16series	<ol style="list-style-type: none"> <li>มีการหลีกเลี่ยงจุดที่ทำให้เกิดความดันต่ำ ณ จุดสูงสุดของใบพัด</li> <li>มีแรงดูดน้อยที่ความเร็วสูง</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>มีแรงยกต่ำ</li> </ol>

จากตารางการเปรียบเทียบข้อดีและข้อเสียของแพนอากาศแต่ละซีรีส์ ทำให้เห็นว่าซีรีส์ 6 นั้นเหมาะสมที่สุดในการนำมาใช้ในชุดทดลองแพนอากาศนากาแบบ 4 ตำแหน่ง(NACA 4-Digit)

## 2.14 การหาควิเทชั่น (Cavitation Number)

เพื่อที่จะเปรียบเทียบระหว่างค่า  $\sigma$  กับ  $\sigma_c$  โดยที่ถ้าค่าของ  $\sigma$  นั้นมากกว่าค่าของ  $\sigma_c$  จะไม่เกิดโพรงอากาศ แต่ถ้าน้อยกว่า ค่าของ  $\sigma_c$  จะเกิด โพรงอากาศ

คำนวณหา ควิเทชั่นแฟคเตอร์ (Cavitation Factor ( $\sigma$ )) ได้จาก

$$\sigma = \frac{H_a - H_v - H_s}{h_t} \quad (2.33)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คำนวณหา คาวิตेशनวิกฤต (Critical Cavitation Factor ( $\sigma_c$ )) ของ กังหันแคปแลน ได้จาก

$$\sigma_c = 1.1 \left[ 0.28 + \frac{1}{7.5} \left( \frac{N_s}{380.78} \right)^3 \right] \quad (2.34)$$

โดยหา ความเร็วเฉพาะ (Specific speed ( $N_s$ )) ของ กังหันแคปแลน ได้จาก

$$N_s = \frac{n\sqrt{P}}{h_t^{3/4}} \quad (2.35)$$

โดยสามารถหา การสูญเสียพลังงานเนื่องจากการไหล (Head loss ( $h_a$ )) ได้จาก

$$h_a = \frac{\text{Input}}{\rho g Q} \quad (2.36)$$

และหา การสูญเสียพลังงานทั้งหมด (Net head on turbine ( $h_t$ )) โดยกฎอนุรักษ์พลังงาน

$$\frac{1}{2} \rho \omega^2 r^2 = \rho g h_t \quad (2.37)$$

- Ha คือ เฮดของความดันบรรยากาศมีค่า 10.3 เมตร  
 Hv คือ เฮดของความดันไออิ่มตัวของน้ำที่อุณหภูมิ 25 องศา มีค่า 0.322 เมตร  
 Hs คือ ระดับจากใบพัดถึงระดับท้ายน้ำให้มีค่าเท่ากับศูนย์เนื่องจากใบพัดอยู่ระดับเดียวกับน้ำ  
 ht คือ เฮดสุทธิบนเทอไบน์  
 ha คือ เฮดรวมของชุดทดสอบ  
 Ns คือ ความเร็วเฉพาะของใบพัด  
 n คือ ความเร็วรอบของใบพัด  
 P คือ กำลังที่ได้จากใบพัด  
 $\rho$  คือ ความหนาแน่นของน้ำ

โดยจะทำการคำนวณกังหันชนิด 3 ใบพัด 4 ใบพัด และ 5 ใบพัด โดยกำหนด อัตราการไหล ที่ 250 320 380 และ 450 ลิตรต่อนาที ซึ่งจะอ้างอิงค่าความเร็วรอบใบพัดและกำลังที่ให้จากชุดทดสอบประสิทธิภาพ ใบพัดเนื่องจากใช้ใบพัดรูปทรงเดียวกัน ศึกษาที่อัตราไหลและท่อขนาดเท่ากัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 3

### การออกแบบชุดทดลอง

#### 3.1 การเลือกคุณสมบัติปั๊มที่ใช้ในการทดลอง

ในการพิจารณาปั๊มให้เหมาะสมกับสภาพการใช้งานจริงจะพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างเฮดกับอัตราการไหลของระบบที่ต้องการนำปั๊มไปใช้งานโดยมีวิธีการคำนวณดังขั้นตอนต่อไปนี้

กำหนดให้ชุดทดลองมีคุณสมบัติดังนี้

1. เส้นผ่านศูนย์กลางท่อภายในระบบเลือกใช้ที่ 63.5 มิลลิเมตร หรือ เท่ากับ 0.0635 เมตร
2. อัตราไหลของระบบเท่ากับ 450 ลิตรต่อนาที มีหน่วย หรือ เท่ากับ 0.0075 ตารางเมตรต่อวินาที
3. ความยาวของชุดทดลอง 5.5 เมตร
4. เลือกปั๊มน้ำ อัตราไหลไม่ต่ำกว่า 450 ลิตรต่อนาที เฮดปั๊มน้ำไม่ต่ำกว่า 13.427 เมตร

#### 3.2 ลักษณะของชุดทดสอบการเกิดโพรงอากาศ

หลังจากที่เราได้ทำการคำนวณการเลือกคุณสมบัติของปั๊มโดยการหาเฮดทั้งหมดของระบบหาระยะปากทางเข้าก่อนถึงใบพัดและควิเทชันนัมเบอร์ที่ได้แสดงไว้ในภาคผนวกข.และนำข้อมูลที่ได้มาสร้างชุดทดสอบการเกิดโพรงอากาศซึ่งได้ส่วนประกอบดังต่อไปนี้



รูปที่ 3-1 ภาพแสดงรูปชุดทดสอบการเกิดโพรงอากาศจริงที่ได้รับการติดตั้งอุปกรณ์ (1)ถังพักน้ำ (2)ใบพัด (3)Ball Valve (4)ปั๊มน้ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3-2 ภาพแสดงใบพัดชนิด 3 ใบ



รูปที่ 3-3 ภาพแสดงใบพัดชนิด 4 ใบ



รูปที่ 3-4 ภาพแสดงใบพัดชนิด 5 ใบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.3 ทำนายการเกิดควิเทชั่นของชุดทดลอง

เพื่อที่จะเปรียบเทียบระหว่างค่า  $\sigma$  กับ  $\sigma_c$  โดยที่ถ้าค่าของ  $\sigma$  นั้นมากกว่าค่าของ  $\sigma_c$  จะไม่เกิด Cavitation แต่ถ้าค่าของ  $\sigma$  มีค่าน้อยกว่า ค่าของ  $\sigma_c$  จะเกิด Cavitation ที่ได้แสดงไว้ในภาคผนวก ค.

### 3.4 เครื่องมือและอุปกรณ์การทดลอง

1. ปัมพ์น้ำเฮดไม่ต่ำกว่า 13.427 เมตร ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อ 3 นิ้ว อัตราการไหล 450 ลิตรต่อนาที
2. Gate valve ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3 นิ้ว
3. ท่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3 นิ้ว และ 4 นิ้ว
4. อุปกรณ์เชื่อมต่อ fitting เช่น ข้ออ (Standard elbow 90) ท่อสามทางและท่อลดขนาด
5. กังหัน 3 แบบคือ 1) ใบพัด 3 ใบ 2) ใบพัด 4 ใบ 3) ใบพัด 5 ใบ

### 3.5 วิธีการทดลอง

1. ติดตั้งชุดกังหันที่ต้องการให้เรียบร้อย
2. ทำการปรับมุมใบพัดและอัตราไหลที่ต้องการทดลอง
3. บรรจุน้ำให้เต็มชุดการทดลอง
4. สังเกตการเกิดโพรงอากาศและบันทึกผล
5. ทำการปรับมุมใบพัดต่างๆ แล้วทำการทดลองจนครบที่กำหนด (20-80) โดยการปรับมุมทีละ 20 องศา
6. ปรับอัตราการไหล 250-450 ลิตรต่อนาที
7. เปลี่ยนกังหันน้ำแล้วทำการทดลองจนครบเพื่อบันทึกผลต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 4

### ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง

จากการทำการทดลองเราสามารถแสดงผลการทดลองออกมาเป็นกราฟของความสัมพันธ์เพื่อให้  
ง่ายต่อการวิเคราะห์และเข้าใจดังต่อไปนี้

รูปที่ 4-1 แสดงการศึกษา การเกิดควิเทชัน ของกังกันน้ำตามแนวแกนแบบขั้นเดี่ยวชนิด 3 ใบ 4  
ใบ และ 5 ใบ ซึ่งมีการปรับเปลี่ยนมุมปะทะ ที่อัตราไหล 250 ลิตรต่อนาที



รูปที่ 4-1 แสดงการเปรียบเทียบการเกิดควิเทชันกับมุมปะทะที่อัตราไหล 250 ลิตรต่อนาที

#### การวิเคราะห์

ที่อัตราไหล 250 ลิตรต่อนาที เราทำการปรับมุมปะทะของใบพัดเพิ่มมากขึ้นตั้งแต่ 20-80 องศา  
ที่ทุกจำนวนของใบพัดแต่ก็ยังไม่สามารถสังเกตควิเทชันได้เนื่องจากอัตราไหลนั้นมีค่าไม่มากพอที่  
ก่อให้เกิดควิเทชัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4-2 แสดงการศึกษา การเกิดควิเทชั่น ของกังหันน้ำตามแนวแกนแบบขั้นเดี่ยวชนิด 3 ใบ 4 ใบ และ 5 ใบ ซึ่งมีการปรับเปลี่ยนมุมปะทะ ที่อัตราการไหล 320 ลิตรต่อนาที



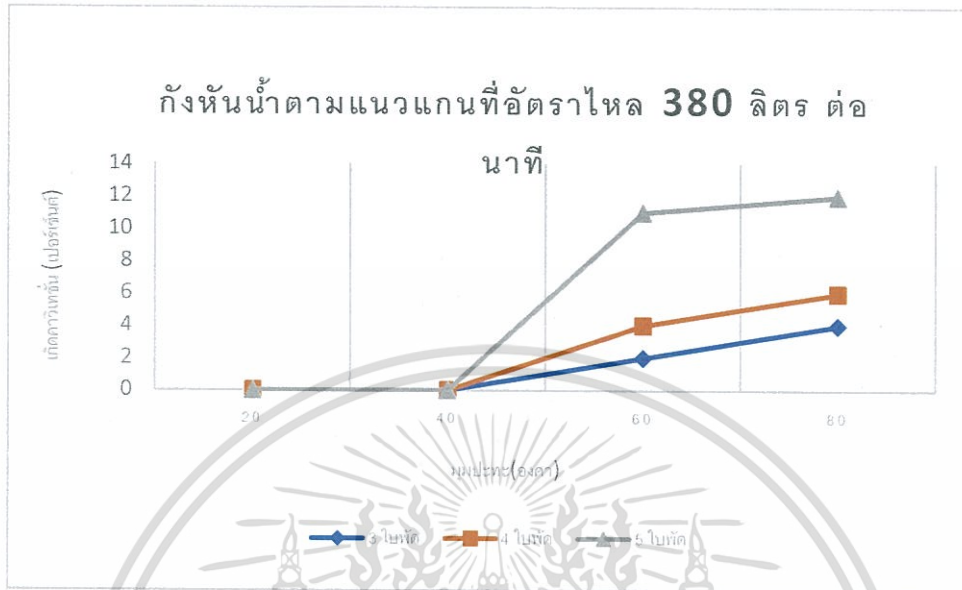
รูปที่ 4-2 แสดงการเปรียบเทียบการเกิดควิเทชั่นกับมุมปะทะที่อัตราการไหล 320 ลิตรต่อนาที

การวิเคราะห์

ทำการเพิ่มอัตราไหลเป็น 320 ลิตรต่อนาที และทำการปรับมุมปะทะของใบพัดตั้งแต่ 20-80 องศาเหมือนเดิม ที่ทุกจำนวนของใบพัดแต่ก็ยังไม่สามารถสังเกตควิเทชั่นได้เนื่องจากอัตราไหลที่เพิ่มขึ้นนั้นก็ไม่มากพอที่ก่อให้เกิดควิเทชั่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4-3 แสดงการศึกษา การเกิดควิเทชั่น ของกังกันน้ำตามแนวแกนแบบชั้นเดี่ยวชนิด 3 ใบ 4 ใบ และ 5 ใบ ซึ่งมีการปรับเปลี่ยนมุมปะทะ ที่อัตราไหล 380 ลิตรต่อนาที



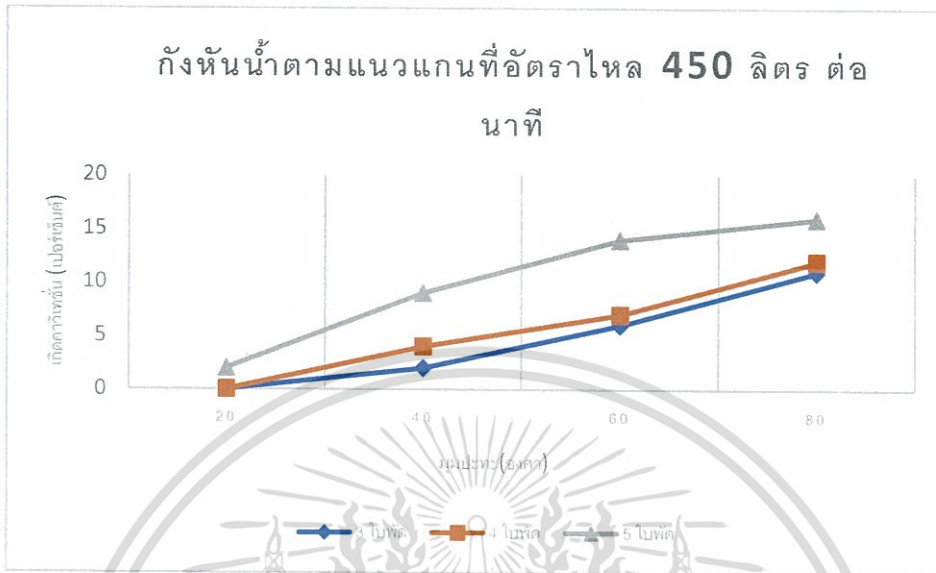
รูปที่ 4-3 แสดงการเปรียบเทียบการเกิดควิเทชั่นกับมุมปะทะที่อัตราไหล 380 ลิตรต่อนาที

การวิเคราะห์

ทำการเพิ่มอัตราไหลเป็น 380 ลิตรต่อนาที และทำการปรับมุมปะทะของใบพัดตั้งแต่ 20-80 องศา ที่ทุกจำนวนของใบพัด โดยจะเห็นได้ว่าจะสามารถสังเกตการเกิดควิเทชั่นได้ เนื่องจากอัตราไหลที่เพิ่มขึ้นนั้นมากพอที่จะก่อให้เกิดควิเทชั่น จากรูปที่ 4-3 จะเห็นได้ว่า ควิเทชั่นนั้นเริ่มเกิดหลังจากปรับมุมปะทะของใบพัดให้มีค่ามากกว่า 40 องศา และ เปอร์เซ็นต์การเกิดควิเทชั่นนั้นเพิ่มขึ้นตามมุมปะทะที่เพิ่มขึ้น โดยที่จำนวนมุมปะทะที่เท่ากันนั้นเปอร์เซ็นต์การเกิดควิเทชั่นจะเพิ่มขึ้นตามจำนวนของใบพัดแทน ซึ่งสามารถสรุปได้ว่าที่มุมปะทะ และ จำนวนใบพัด ที่เพิ่มขึ้นล้วนส่งผลให้เกิดเปอร์เซ็นต์การเกิดควิเทชั่นที่เพิ่มขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4-4 แสดงการศึกษา การเกิดควิวเทชั่น ของกังหันน้ำตามแนวแกนแบบขั้นเดี่ยวชนิด 3 ใบ 4 ใบ และ 5 ใบ ซึ่งมีการปรับเปลี่ยนมุมปะทะ ที่อัตราการไหล 450 ลิตรต่อนาที



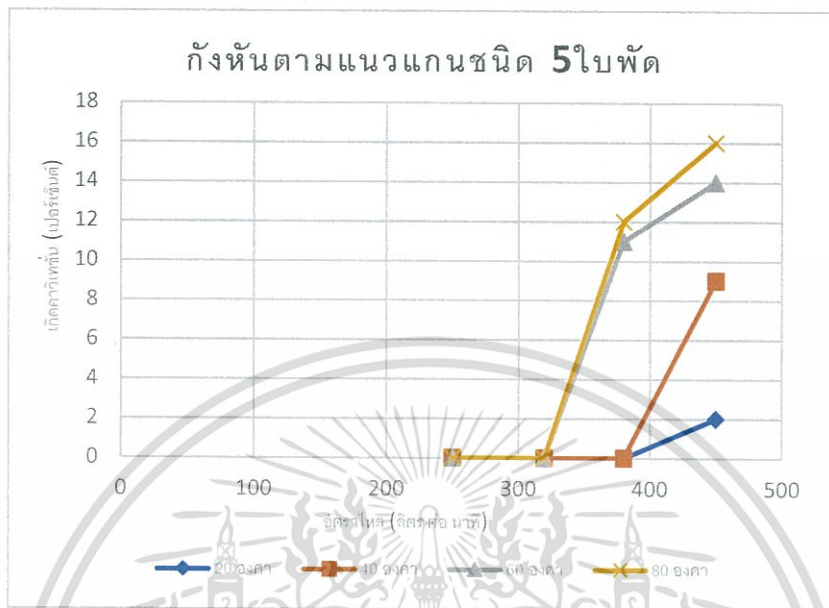
รูปที่ 4-4 แสดงการเปรียบเทียบการเกิดควิวเทชั่นกับมุมปะทะที่อัตราการไหล 450 ลิตรต่อนาที

การวิเคราะห์

ทำการเพิ่มอัตราไหลเป็น 450 ลิตรต่อนาที และทำการปรับมุมปะทะของใบพัดตั้งแต่ 20-80 องศา ที่ทุกจำนวนของใบพัดโดยจะเห็นได้ว่าจะสามารถสังเกตการเกิดควิวเทชั่นได้เนื่องจากอัตราไหลที่เพิ่มขึ้นนั้นมากพอที่จะทำให้เกิดควิวเทชั่น จากรูปที่ 4-4 จะเห็นได้ว่า ควิวเทชั่นนั้นเริ่มเกิดตั้งแต่มุมปะทะของใบพัดที่มีค่า 40 องศา เนื่องจากอัตราการไหลที่มากทำให้เกิดควิวเทชั่นได้แม้ในมุมปะทะที่มีค่าน้อย และจะเห็นได้ว่าเปอร์เซ็นต์การเกิดควิวเทชั่นนั้นเพิ่มขึ้นในมุมปะทะที่เพิ่มขึ้น โดยที่จำนวนใบพัดเท่าเดิม และถ้ามุมใบพัดเท่าเดิมก็จะเพิ่มตามจำนวนใบพัดแทน ถ้าเปรียบเทียบรูปที่ 4-4 กับ 4-3 จะเห็นได้ว่าเปอร์เซ็นต์การเกิดควิวเทชั่นนั้นมากขึ้นตามอัตราการไหลด้วยเช่นกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4-5 แสดงการศึกษา การเกิดควาวิเทชน์ ของกังหันน้ำตามแนวแกนแบบชั้นเดี่ยว ชนิด 3 ใบ 4 ใบ และ 5 ใบ ซึ่งมีการปรับอัตราการไหลของน้ำและมุมปะทะ ของกังหันตามแนวแกนชนิด 3 ใบพัด



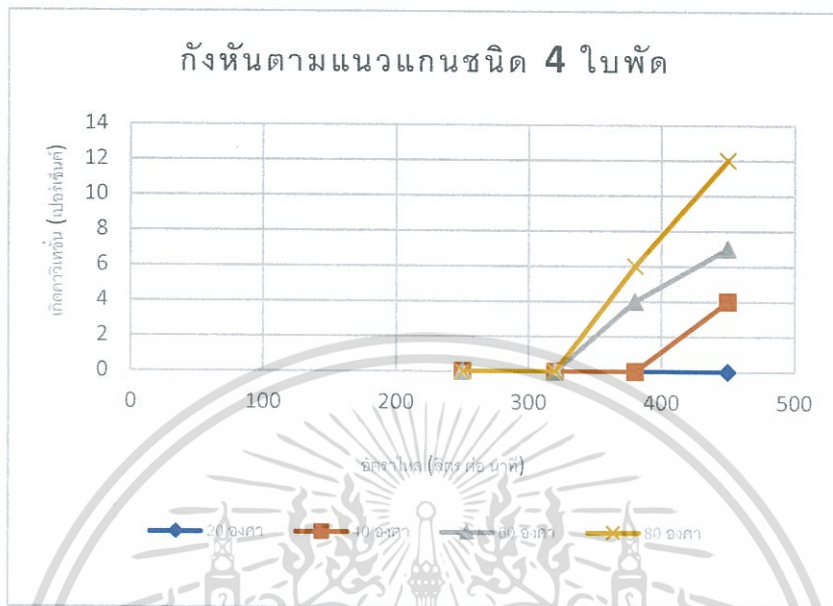
รูปที่ 4-5 แสดงการเปรียบเทียบการเกิดควาวิเทชน์กับอัตราการไหลที่ความเร็วต่างๆของกังหันตามแนวแกนชนิด 3 ใบพัด

การวิเคราะห์

กังหันตามแนวแกนชนิด 3 ใบพัด จะทำการปรับอัตราการไหลตั้ง 250 ลิตรต่ออนาทีถึง 450 ลิตรต่ออนาที และมีการปรับมุมปะทะของใบพัดเพิ่มมากขึ้นตั้งแต่ 20-80 องศา ที่ชนิด 3 ใบพัด ควาวิเทชน์จะเริ่มเกิดที่อัตราการไหล 380 ลิตรต่ออนาที มุมปะทะ 60-80 องศา และ 450 ลิตรต่ออนาที มุมปะทะ 40-80 องศา เมื่ออัตราการไหลสูงขึ้น การเกิดควาวิเทชน์จะมีโอกาสเกิดมากขึ้นและเริ่มเกิดควาวิเทชน์ตั้งแต่มุมน้อยๆ แต่ที่มุม 20 องศาของ ชนิด 3 ใบพัด ไม่เกิดควาวิเทชน์ขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4-6 แสดงการศึกษา การเกิดควิเทชัน ของกังหันน้ำตามแนวแกนแบบขั้นเดี่ยว ชนิด 3 ใบ 4 ใบ และ 5 ใบ ซึ่งมีการปรับอัตราการไหลของน้ำและมุมปะทะ ของกังหันตามแนวแกนชนิด 4 ใบพัด



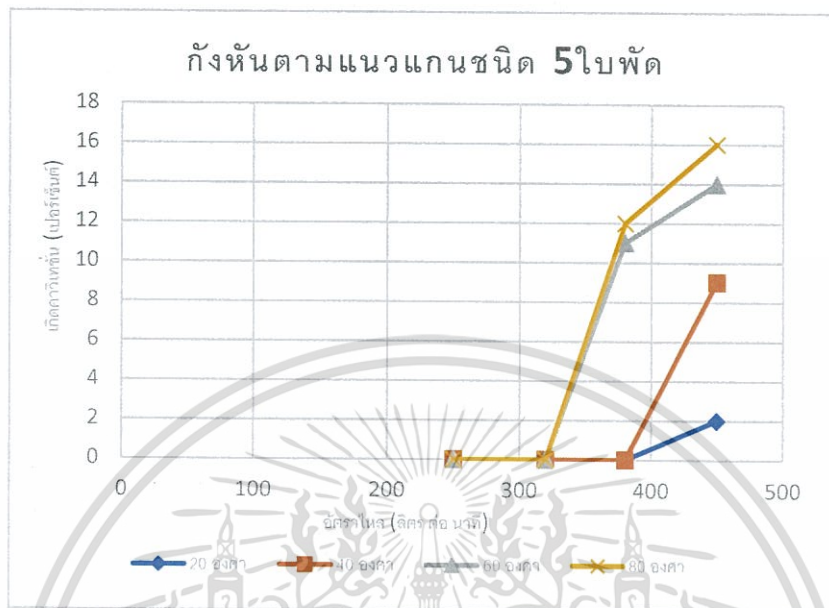
รูปที่ 4-6 แสดงการเปรียบเทียบการเกิดควิเทชันกับอัตราการไหลที่ความเร็วต่างๆของกังหันตามแนวแกนชนิด 4 ใบพัด

การวิเคราะห์

กังหันตามแนวแกนชนิด 4 ใบพัด จะทำการปรับอัตราการไหลตั้ง 250 ลิตรต่อนาทีถึง 450 ลิตรต่อนาที และมีการปรับมุมปะทะของใบพัดเพิ่มมากขึ้นตั้งแต่ 20-80 องศา ที่ชนิด 4 ใบพัด ควิเทชันจะเริ่มเกิดที่อัตราการไหล 380 ลิตรต่อนาที มุมปะทะ 60-80 องศา และ 450 ลิตรต่อนาที มุมปะทะ 40-80 องศา เมื่ออัตราการไหลสูงขึ้น การเกิดควิเทชันจะมีโอกาสเกิดมากขึ้นและเริ่มเกิดควิเทชันตั้งแต่มุมน้อยๆ แต่ที่มุม 20 องศาของ ชนิด 4 ใบพัด ไม่เกิดควิเทชันขึ้น ซึ่งเหมือนกับชนิด 3 ใบพัด แต่ชนิด 4 ใบพัด เปอร์เซนต์การเกิดควิเทชันมีค่าสูงกว่าชนิด 3 ใบพัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4-7 แสดงการศึกษา การเกิดควิเทชัน ของกังหันน้ำตามแนวแกนแบบขั้นเดี่ยว ชนิด 3 ใบ 4 ใบ และ 5 ใบ ซึ่งมีการปรับอัตราการไหลของน้ำและมุมปะทะ ของกังหันตามแนวแกนชนิด 5 ใบพัด



รูปที่ 4-7 แสดงการเปรียบเทียบการเกิดควิเทชันกับอัตราการไหลที่ความเร็วต่างๆของกังหันตามแนวแกนชนิด 5 ใบพัด

การวิเคราะห์

กังหันตามแนวแกนชนิด 5 ใบพัด จะทำการปรับอัตราการไหลตั้ง 250 ลิตรต่อนาทีถึง 450 ลิตรต่อนาที และมีการปรับมุมปะทะของใบพัดเพิ่มมากขึ้นตั้งแต่ 20-80 องศา ที่ชนิด 5 ใบพัด ควิเทชันจะเริ่มเกิดที่อัตราการไหล 380 ลิตรต่อนาที มุมปะทะ 60-80 องศา และ 450 ลิตรต่อนาที มุมปะทะ 20-80 องศา ซึ่งแตกต่างจากชนิด 3 ใบพัด และ 4 ใบพัด เมื่ออัตราการไหลสูงขึ้น การเกิดควิเทชันจะมีโอกาสเกิดมากขึ้นและเริ่มเกิดควิเทชันตั้งแต่มุมน้อยๆ แต่ที่มุม 20 องศาของ ชนิด 5 ใบพัด มีการเกิดควิเทชันขึ้น ซึ่งแตกต่างจากชนิด 3 ใบพัดและชนิด 4 ใบพัด เปอร์เซ็นต์การเกิดควิเทชันของชนิด 5 ใบมีค่าสูงกว่าชนิด 3 ใบพัดและ 4 ใบพัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากตารางที่ ข.1 ถึง ตารางที่ ข.3 จากภาคผนวก ข. สามารถสรุปได้ดังนี้

กัณฑ์ชนิด 3 ใบพัด เมื่อนำมาใช้กับอัตราไหล 250 ลิตรต่อนาที และ 320 ลิตรต่อนาที มุมปะทะ 20-80 องศา จะไม่เกิดควาวิเทชัน เมื่อเพิ่มอัตราการไหลเป็น 380 ลิตรต่อนาที จะเกิดควาวิเทชันที่มุมปะทะ 60 องศา และเกิดมากขึ้นเมื่อปรับมุมปะทะเป็น 80 องศา และเมื่อปรับอัตราการไหลเป็น 450 ลิตรต่อนาที จะเกิดควาวิเทชันที่ มุมปะทะ 40 องศา 60 องศา และ 80 องศา ซึ่งเปอร์เซนของควาวิเทชันเพิ่มขึ้นตามลำดับ

กัณฑ์ชนิด 4 ใบพัด จะเกิดควาวิเทชันเมื่อปรับอัตราการไหลเป็น 380 ลิตรต่อนาที และ 450 ลิตรต่อนาที โดยที่อัตราการไหล 380 ลิตรต่อนาที จะเกิดที่มุมปะทะ 60 และ 80 องศา ส่วนที่อัตราการไหล 450 ลิตรต่อนาที จะเกิดตั้งแต่มุมปะทะ 40 องศา จนถึง 80 องศา และจะเกิดมากที่สุดที่มุม 80 องศา

กัณฑ์ชนิด 5 ใบพัด จะเกิดควาวิเทชันที่อัตราการไหล 380 ลิตรต่อนาที และ 450 ลิตรต่อนาที โดยที่อัตราการไหล 380 ลิตรต่อนาที จะเกิดที่มุมปะทะ 60 และ 80 องศา ส่วนอัตราการไหล 450 ลิตรต่อนาที จะเกิดควาวิเทชันตั้งแต่มุมปะทะ 20 องศา จนถึง 80 องศา

กัณฑ์ชนิดต่างๆ จะเริ่มเกิดควาวิเทชันที่อัตราการไหล 380 ลิตรต่อนาที และจะมีเปอร์เซนควาวิเทชันมากที่สุดเมื่อปรับอัตราการไหลเป็น 450 ลิตรต่อนาที ที่มุมปะทะ 80 องศา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 5

# บทสรุปการดำเนินงานและข้อเสนอแนะ

### 5.1 สรุปผลการดำเนินงาน

5.1.1 คาวีเทชั่นไม่เกิดที่อัตราไหลที่มีค่าน้อยแต่จะเริ่มเกิดที่อัตราไหลที่มีค่ามาก เนื่องจากอัตราไหลยิ่งมากจะทำให้ความดันหลังใบพัดมีค่าน้อยกว่าความดันไอน้ำแล้วเกิดคาวีเทชั่น

5.1.2 การเกิดคาวีเทชั่นที่ใบพัดชนิดเดียวกันจะเริ่มเกิดที่มุมปะทะต่างกันถ้าอัตราไหลมีค่าไม่เท่ากันโดยยิ่งอัตราไหลมีค่าเพิ่มขึ้นคาวีเทชั่นจะเริ่มเกิดที่มุมปะทะที่มีค่าน้อยลง

5.1.3 ถ้าอัตราไหลและจำนวนใบพัดคงที่คาวีเทชั่นจะขึ้นอยู่กับมุมปะทะโดยยิ่งมุมปะทะเพิ่มขึ้นก็ส่งผลให้การเกิดคาวีเทชั่นเพิ่มขึ้นดังนั้นควรเลือกใช้ที่มีมุมปะทะน้อยๆ

5.1.4 ถ้าอัตราไหลและมุมปะทะคงที่การเกิดคาวีเทชั่นจะขึ้นอยู่กับจำนวนใบพัดโดยยิ่งจำนวนใบพัดเพิ่มขึ้นส่งผลให้การเกิดคาวีเทชั่นเพิ่มขึ้นดังนั้นการเลือกใช้ควรที่จะใช้ที่จำนวนใบพัดน้อยที่สุด

### 5.2 วิจารณ์และข้อเสนอแนะ

การสร้างชุดทดสอบการเกิดโพรงอากาศของกังหันน้ำไหลตามแนวแกนนั้นเป็นเพียงการทดสอบขั้นต้นโดยทำการศึกษาปัจจัยที่ก่อให้เกิดโพรงอากาศ ซึ่งประกอบไปด้วย อัตราไหล มุมปะทะ และ จำนวนใบพัด โดยการศึกษาในรายละเอียดต่อไปควรคำนึงถึงปัจจัยต่างๆที่อาจมีผลต่อการเกิดโพรงอากาศเพิ่มเติมเพื่อจะได้ทราบและสามารถหลีกเลี่ยงการเกิดโพรงอากาศในกังหันน้ำไหลตามแนวแกนให้ได้มากที่สุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บรรณานุกรม

- [1] จรัส บูรณะกิติ, จเร หมอทรัพย์, อุทัย องค์กรชัยคุปต์. การศึกษาประสิทธิภาพของกังหันน้ำตามแนวแกนแบบขั้นเดียว วิทยานิพนธ์ วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2549
- [2] Nabil H. Mostafa and Mohamed Adel. *Unsteady Numerical and Experimental study of Cavitation in Axial Pump*. Mechanical Power Engineering Department, Engineering Faculty Zagazing University, 2012
- [3] S . Khurana, Navtej and Hardeep Singh. *Effect of cavitation on hydraulic turbine*. Mechanical Engineering, Baddi University of Emerging Sciences and Technology Baddi, 2011
- [4] Christopher E. Brennen. *Fundamentals of Multiphase Flows*. California Institute of Technology Pasadena, California



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก.  
ค่าคงที่ในการคำนวณ

ค่าคงตัวของฮาเซน-วิลเลียมส์ เป็นค่าที่จำเป็นในการออกแบบชุดทดลอง จึงได้รวบรวมค่าที่จำเป็นไว้ดังนี้

ตารางที่ ก 1 ค่าคงตัวของฮาเซนวิลเลียมส์ (C)

ชนิดของท่อ	ช่วง(m)	ท่อสะอาด(m)	C ใช้ออกแบบ
เหล็กกล้า (steel)			
เหล็กเชื่อมไร้รอยต่อ (welded and seamless)	80-150	140	100
เหล็ก (iron)			
เหล็กหล่อ (cast iron)	80-150	130	100
เหล็กพืด (wrought iron)	80-150	130	100
อื่นๆ(miscellaneous)			
เส้นใย (fiber)		150	140
ทองแดงและทองเหลือง (copper and brass)	120-150	140	130
ตะกั่ว ดีบุก แก้ว (lead,tin,glass)	120-150	140	130
พลาสติก (plastic)	120-150	140	130

ค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสีย เป็นค่าที่จำเป็นในการออกแบบชุดทดลอง จึงได้รวบรวมค่าที่จำเป็นไว้ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก 2 ค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสีย K

1. ข้อมุม (elbow)	
90 องศา (ปกติ) แบบหน้าแปลน	K=0.3
90 องศา (ปกติ) แบบเกลียว	K=1.5
90 องศา (รัศมีสั้น)	K=0.9
90 องศา (รัศมีปานกลาง)	K=0.75
90 องศา (รัศมียาว)	K=0.6
45 องศา	K=0.42
2. ข้อต่อสามทาง (tee)	
ไหลในแนวเดิม , แบบหน้าแปลน	K=0.2
ไหลในแนวเดิม , แบบเกลียว	K=0.9
ไหลในแยก, แบบหน้าแปลน	K=1.0
ไหลแยก , แบบเกลียว	K=0.2
3. วาล์วกันกลับ (เปิดสุด) (check valve fully open)	
แบบสวิง (swing type)	K=0.25
แบบลูกปืน (ball type)	K=0.75
แบบลิฟท์ (lift type)	K=12.0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ข.

## คำนวณและออกแบบชุดทดลอง

## 1. การหาความเร็วของระบบ

สามารถหาได้จากสมการ

$$Q = AV \quad (\text{ข.1})$$

เมื่อ  $Q$  = อัตราไหลของระบบ มีหน่วย ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที $A$  = พื้นที่หน้าตัดของท่อน้ำ มีหน่วย ตารางเมตร $V$  = ความเร็วของระบบ มีหน่วย เมตรต่อวินาที

$$V = \frac{0.02}{\pi \times 0.635^2 / 4}$$

$$V = 6.3 \text{ m/s}$$

## 2. การหาเฮดปั้มน้ำ

สามารถหาได้จากสมการ

$$h = h_L + h_t \quad (\text{ข.2})$$

เมื่อ  $h$  = เฮดทั้งหมดโดยอยู่ในรูปความสูงของน้ำ เมตร $h_L$  = เฮดสูญเสียของการไหล โดยอยู่ในรูปความสูงของน้ำ เมตร $h_t$  = เฮดของชุดใบพัด โดยอยู่ในรูปความสูงของน้ำ เมตรโดยสามารถหา  $h_L$  ได้จากสมการ

$$h_L = h_{major} + h_{minor} \quad (\text{ข.3})$$

หรือ

$$h_L = f \left( \frac{L}{D} \right) \frac{V^2}{2g} + \sum k \frac{V^2}{2g} \quad (\text{ข.4})$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พิจารณา  $h_{major}$

$$h_{major} = f \left( \frac{L}{D} \right) \frac{V^2}{2g} = \frac{1.215 \times 10^{10} \times Q^{1.852} \times L}{C^{1.852} \times D^{4.87}} \quad (\text{ข.5})$$

เมื่อ  $L$  = ความยาวท่อรวมของระบบ มีค่าเท่ากับ 4.4 เมตร

$C$  = ค่าคงตัวของเฮเซน-วิลเลียมส์ มีค่าเท่ากับ 140

$Q$  = อัตราไหลมีค่าเท่ากับ 0.0075 ตารางเมตรต่อวินาที

ทำการแทนค่าสมการ

$$h_{major} = \frac{1.215 \times 10^{10} \times 0.75^{1.852} \times 5.5}{140^{1.852} \times 63.5^{4.87}}$$

$$= 3.02 \text{ m}$$

พิจารณา  $h_{minor}$

$$h_{minor} = \sum k \frac{V^2}{2g}$$

(ข.6)

เมื่อ  $K$  คือ สัมประสิทธิ์การสูญเสียซึ่งมีค่าดังนี้

ข้ออ 90 องศา ขนาด 3 นิ้ว  $K = 0.54$

ท่อสามทางไหลแยกแบบเกลียว ขนาด 3 นิ้ว  $K = 1.08$

ท่อขยายจาก 3 นิ้วครึ่ง ไป 4 นิ้ว  $K = 0.38$

ท่อสามทางไหลแยกแบบเกลียว ขนาด 4 นิ้ว  $K = 1.02$

เกตวาล์ว (เปิดเต็มที่)  $K = 0.14$

ทำการแทนค่าสมการ

$$h_{minor} = (3(0.54) + 1.08 + 0.38 + 1.02 + 0.14) \frac{6.3^2}{2(9.81)}$$

$$h_{minor} = 8.58 \text{ m}$$

ดังนั้นค่าเฮดสูญเสียรวมมีค่าเท่ากับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$h_L = 8.58 + 0.007$$

$$h_L = 8.587 \text{ m}$$

สามารถหา  $h_t$  ได้โดย

กำหนดให้ใบพัดทำความเร็วในย่านความเร็วรอบที่  $\omega = 300 \text{ rad/s}$  รัศมีเฉลี่ยจากจุดกึ่งกลางท่อเท่ากับ 32.5 มิลลิเมตร และสมมุติให้การเปลี่ยนแปลงพลังงานระหว่างชุดใบพัดเกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์ ไม่มีการสูญเสียเกิดขึ้น จะสามารถหาความดันที่ตกค่อมได้ดังต่อไปนี้

$$\text{พลังงานจลน์} = \frac{1}{2} \rho V^2 = \frac{1}{2} \rho \omega^2 r^2 \quad (\text{ข.7})$$

$$\text{พลังงานศักย์} = \rho g h_t \quad (\text{ข.8})$$

จากกฎการอนุรักษ์พลังงาน พลังงานไม่มีการสูญเสีย

$$\rho g h_t = \frac{1}{2} \rho \omega^2 r^2 \quad (\text{ข.9})$$

$$h_t = \frac{1}{2} \omega^2 r^2 \frac{1}{g}$$

$$h_t = \frac{1}{2} 300^2 (32.5 \times 10^{-3})^2 \frac{1}{9.81}$$

$$h_t = 4.84 \text{ m}$$

เฮดทั้งหมดของปั๊มจึงมีค่าเท่ากับ

$$h_m = 8.587 + 4.84$$

$$h_m = 13.427 \text{ m}$$

ดังนั้นคุณสมบัติที่ใช้เป็นเกณฑ์ในการเลือกปั๊มน้ำ จะเลือกจากคุณสมบัติดังนี้

อัตราไหลไม่ต่ำกว่า 450 ลิตรต่อนาที

เฮดปั๊มน้ำไม่ต่ำกว่า 13.427 เมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ข.1 ภาพแสดงรูปปั๊มหอยโข่ง อัตราการไหล 250 – 450 ลิตรต่อนาที ที่ใช้ในการ

### 3 ทหาระยะปากทางเข้าก่อนถึงใบพัด

หาค่า Re ได้จากสูตร

$$Re = \frac{\rho V D}{\mu}$$

(ข.10)

ที่อัตราการไหล 450 ลิตรต่อนาที ที่น้ำ 25°C

$$Re = \frac{996.95 \times 2.467 \times 0.1016}{8.9925 \times 10^{-4}}$$

$$Re = 277879.04$$

ที่อัตราการไหล 380 ลิตรต่อนาที

$$Re = \frac{996.95 \times 2.22 \times 0.1016}{8.9925 \times 10^{-4}}$$

$$Re = 247804.57$$

ที่อัตราการไหล 320 ลิตรต่อนาที

$$Re = \frac{996.95 \times 2.09 \times 0.1016}{8.9925 \times 10^{-4}}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$h_a = \frac{458.82}{1000(9.81)(0.00417)}$$

$$N_s = \frac{106\sqrt{21.8492}}{11.216^{\frac{5}{4}}}$$

ที่อัตราการไหล 250 ลิตรต่อนาที

$$Re = \frac{996.95 \times 1.85 \times 0.1016}{8.9925 \times 10^{-4}}$$

$$Re = 208381.12$$

จากการคำนวณพบว่าการไหลภายในท่อเป็นการไหลแบบปั่นป่วน ซึ่งสามารถหาระยะปากทางเข้าของการไหลแบบปั่นป่วนได้เพื่อนำไปใช้ในการออกแบบชุดทดลอง

$$L_h \approx 10D$$

$$L_h \approx 10 \times 0.1016$$

$$L_h \approx 1.016 \text{ เมตร}$$

(ข.11)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ค.

คำนวณและเปรียบเทียบเพื่อทำนายการเกิดคาวิเทชัน

การหา Cavitation Number

กึ่งหุ่นชนิด 3 ใบ

อัตราการไหล 250 ลิตรต่อนาที โดยมี Input = 458.82 วัตต์

ที่ 20° โดยมี n=106 รอบต่อนาที P=21.8492 วัตต์

$$h_a = \frac{458.82}{1000(9.81)(0.00417)}$$

$$= 11.216 \text{ m}$$

คำนวณหา  $N_s$

$$N_s = \frac{106\sqrt{21.8492}}{11.216^{\frac{5}{4}}}$$

$$= 24.139$$

คำนวณหา  $\sigma_c$

$$\sigma_c = 1.1 \left[ 0.28 + \left( \frac{1}{7.5} \left( \frac{24.139}{380.78} \right)^3 \right) \right]$$

$$= 0.30897$$

คำนวณหา  $h_t$

$$h_t = \frac{0.5 \times 39.9^2 \times (32.5 \times 10^{-3})^2}{9.81}$$

$$= 0.0857 \text{ m}$$

คำนวณหา  $\sigma$

$$\sigma = \frac{10.3 - 0.322}{0.0857}$$

$$= 116.43$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$\sigma$  มากกว่า  $\sigma_c$  ไม่เกิด Cavitation

ตารางที่ ค.1 แสดงค่าจากการคำนวณเพื่อทำนายการเกิดคาวิเทชันของกังหันชนิด 3 ใบพัด

Flow rate (L/s)	Angle of attack (degree)	Specific speed	Net head on turbine (m)	Cavitation number	Cavitation critical	Predict
250	20	24.139	0.0857	116.43	0.310	ไม่เกิด
	40	47.606	0.435	22.940	0.460	ไม่เกิด
	60	250.458	1.3	7.675	2.252	ไม่เกิด
	80	258.541	1.812	5.506	2.445	ไม่เกิด
320	20	29.510	0.096	103.94	0.310	ไม่เกิด
	40	145.100	0.530	18.820	0.570	ไม่เกิด
	60	361.581	1.611	6.200	4.381	ไม่เกิด
	80	514.832	2.970	3.360	12.063	เกิด
380	20	35.896	0.099	100.788	0.310	ไม่เกิด
	40	178.831	0.544	18.340	0.658	ไม่เกิด
	60	428.382	1.617	6.170	5.110	ไม่เกิด
	80	652.515	3.150	3.170	17.237	เกิด
450	20	26.361	0.064	155.900	0.309	ไม่เกิด
	40	174.935	0.468	21.320	0.577	ไม่เกิด
	60	467.742	1.56	6.390	5.471	ไม่เกิด
	80	715.798	2.970	3.360	18.774	เกิด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค.2 แสดงค่าจากการคำนวณเพื่อทำนายการเกิดคาวิเทชันของกังหันชนิด 4 ใบพัด

Flow rate (L/s)	Angle of attack (degree)	Specific speed	Net head on turbine (m)	Cavitation number	Cavitation critical	Predict
250	20	20.75	0.0744	134.133	0.310	ไม่เกิด
	40	109.86	0.503	19.840	0.471	ไม่เกิด
	60	270.229	1.124	8.877	2.7112	ไม่เกิด
	80	453.005	2.245	4.440	11.731	เกิด
320	20	23.370	0.070	142.951	0.31	ไม่เกิด
	40	142.302	0.571	17.474	0.571	ไม่เกิด
	60	374.111	1.382	7.220	4.812	ไม่เกิด
	80	668.672	2.995	3.332	26.007	เกิด
380	20	21.818	0.055	180.76	0.309	ไม่เกิด
	40	143.968	0.3684	27.084	0.490	ไม่เกิด
	60	447.663	1.3856	7.201	5.750	ไม่เกิด
	80	826.232	3.1447	3.173	34.715	เกิด
450	20	18.143	0.042	237.57	0.308	ไม่เกิด
	40	203.105	0.499	19.990	0.730	ไม่เกิด
	60	1275.233	1.3106	7.613	5.817	ไม่เกิด
	80	2418.214	3.069	3.251	37.870	เกิด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค.3 แสดงค่าจากการคำนวณเพื่อทำนายการเกิดคาวิเทชันของกังหันชนิด 5 ใบพัด

Flow rate (L/s)	Angle of attack (degree)	Specific speed	Net head on turbine (m)	Cavitation number	Cavitation critical	Predict
250	20	24.453	0.090	110.620	0.310	ไม่เกิด
	40	109.972	0.344	29.031	0.473	ไม่เกิด
	60	292.468	1.105	9.031	3.409	ไม่เกิด
	80	468.157	2.108	4.733	13.025	เกิด
320	20	24.955	0.081	123.490	0.309	ไม่เกิด
	40	116.136	0.3374	29.570	0.443	ไม่เกิด
	60	411.910	1.351	7.383	6.346	ไม่เกิด
	80	639.829	2.503	3.986	22.838	เกิด
380	20	25.753	0.0655	152.336	0.309	ไม่เกิด
	40	125.082	0.306	32.608	0.428	ไม่เกิด
	60	502.240	1.364	7.315	8.069	เกิด
	80	781.123	2.603	3.833	29.479	เกิด
450	20	20.785	0.0469	212.75	0.308	ไม่เกิด
	40	120.009	0.272	36.683	0.396	ไม่เกิด
	60	522.864	1.289	7.740	8.519	เกิด
	80	836.254	2.571	3.880	29.838	เกิด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

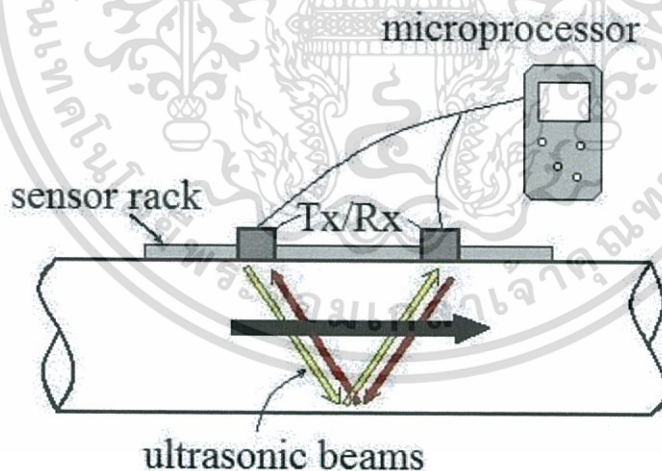
## ภาคผนวก ง.

## การวัดอัตราการไหล (Discharge measurement)

ในการวัดอัตราการไหลภายในท่อ นั้นสามารถทำได้โดยการใช้เครื่องมือวัด (Ultrasonic Flow Meter) หลักการทำงานของอัลตราโซนิกโฟลว์มิเตอร์ คือ อาศัยคลื่นความถี่เหนือเสียงซึ่งมีความถี่สูงเกินที่มนุษย์จะได้ยิน ที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรมส่วนใหญ่มีอยู่ 2 ประเภท คือ Doppler และ Transit Time

1. Doppler Ultrasonic Flowmeter
2. Transit Time Ultrasonic Flowmeter

แต่ในที่นี้เราจะใช้ Transit Time Ultrasonic Flowmeter ในการหาอัตราการไหลภายในท่อ Transit Time Ultrasonic Flowmeter จะอาศัยหลักการของเวลาที่คลื่นเสียงเดินทางผ่านของไหล โดยจะพิจารณาค่าความแตกต่างของเวลา ระหว่าง ทิศทางที่คลื่นเสียงเดินทางสวนกระแส flow และทิศทางตามกระแส flow ซึ่ง Transit Time Ultrasonic Flowmeter นี้สามารถเรียกอีกชื่อว่า Time of flight หรือ Time of Travel



รูปที่ ข1.รูปแสดงการใช้เครื่อง Transit Time Ultrasonic Flowmeter

ในรูปตัวอย่างจะเห็นว่ามียุกรณ์เซนเซอร์ติดตั้งอยู่ 2 ตัว ตัวหนึ่งเป็น Upstream อีกตัวหนึ่งเป็น Downstream ซึ่งแต่ละตัวจะปล่อยคลื่นอัลตราโซนิกความถี่สูงออกไปหาอีกตัวหนึ่งดังรูป ระบบประมวล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลจะตรวจจับความแตกต่างของเวลาที่คลื่นเสียงเดินทางตามทิศทางและสวนทิศทางของ flow และแปลงค่าออกมาเป็นค่า flow ตามสมการต่อไปนี้

$$T_{\text{down}} = ( D / \sin q ) / ( c + V \cdot \cos q ), \quad (\text{ง.1})$$

$$T_{\text{up}} = ( D / \sin q ) / ( c - V \cdot \cos q ), \quad (\text{ง.2})$$

$$(\Delta T = T_{\text{up}} - T_{\text{down}}.) \quad (\text{ง.3})$$

$$V = ( D / \sin 2q ) * \Delta T / (T_{\text{up}} * T_{\text{down}}) \quad (\text{ง.4})$$

$$Q = K * A * V \quad (\text{ง.5})$$

- โดย
- Tup คือ เวลาที่คลื่นเสียงวิ่งจาก Upstream ไป Downstream
  - Tdown คือ เวลาที่คลื่นเสียงวิ่งจาก Downstream ไป Upstream
  - D คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของภายในท่อ
  - Q คือ ค่าอัตราการไหลของเหลวมีหน่วยเป็นปริมาตรต่อเวลา
  - A คือ พื้นที่หน้าตัดท่อก
  - V คือ ความเร็วของไหล
  - K คือ ค่าสัมประสิทธิ์ของตัวเครื่อง จะทราบค่าตอนสอบเทียบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก จ.

## ผลการทดลอง

ในส่วนนี้จะได้กล่าวถึงผลการทดลอง ที่ดำเนินการทดลอง โดยวิธีการในบทที่ 4 โดยมีการปรับเปลี่ยนค่าต่างๆ ซึ่งส่งผลต่อการเกิดควาวิเทชั่นดังผลการทดลองต่อไปนี้

ตารางจ.1 แสดงผลการเกิดควาวิเทชั่นที่อัตราไหล 250 ลิตรต่อนาที

มุมปะทะ (องศา)	การเกิดควาวิเทชั่น (เปอร์เซ็นต์)		
	กึ่งหันชนิด 3 ใบพัด	กึ่งหันชนิด 4 ใบพัด	กึ่งหันชนิด 5 ใบพัด
20	0	0	0
40	0	0	0
60	0	0	0
80	0	0	0

ตารางจ.2 แสดงผลการเกิดควาวิเทชั่นที่อัตราไหล 320 ลิตรต่อนาที

มุมปะทะ (องศา)	การเกิดควาวิเทชั่น (เปอร์เซ็นต์)		
	กึ่งหันชนิด 3 ใบพัด	กึ่งหันชนิด 4 ใบพัด	กึ่งหันชนิด 5 ใบพัด
20	0	0	0
40	0	0	0
60	0	0	0
80	0	0	0

ตารางจ.3 แสดงผลการเกิดควาวิเทชั่นที่อัตราไหล 380 ลิตรต่อนาที

มุมปะทะ (องศา)	การเกิดควาวิเทชั่น (เปอร์เซ็นต์)		
	กึ่งหันชนิด 3 ใบพัด	กึ่งหันชนิด 4 ใบพัด	กึ่งหันชนิด 5 ใบพัด
20	0	0	0
40	0	0	0
60	2	4	11
80	4	6	12

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางจ.4 แสดงผลการเกิดควาวิเทชั่นที่อัตราไหล 450 ลิตรต่อนาที

มูมปะทะ (องศา)	การเกิดควาวิเทชั่น (เปอร์เซ็นต์)		
	กั๊งหันชนิด 3 ใบพัด	กั๊งหันชนิด 4 ใบพัด	กั๊งหันชนิด 5 ใบพัด
20	0	0	2
40	2	4	9
60	6	7	14
80	11	12	16

ตารางจ.5 แสดงผลการเกิดควาวิเทชั่นที่กั๊งหันชนิด 3 ใบพัด

อัตราไหล (ลิตร/นาทึ)	การเกิดควาวิเทชั่น (เปอร์เซ็นต์)			
	มูมปะทะ 20 (องศา)	มูมปะทะ 40 (องศา)	มูมปะทะ 60 (องศา)	มูมปะทะ 80 (องศา)
250	0	0	0	0
320	0	0	0	0
380	0	0	2	4
450	0	2	6	11

ตารางจ.6 แสดงผลการเกิดควาวิเทชั่นที่กั๊งหันชนิด 4 ใบพัด

อัตราไหล (ลิตร/นาทึ)	การเกิดควาวิเทชั่น (เปอร์เซ็นต์)			
	มูมปะทะ 20 (องศา)	มูมปะทะ 40 (องศา)	มูมปะทะ 60 (องศา)	มูมปะทะ 80 (องศา)
250	0	0	0	0
320	0	0	0	0
380	0	0	4	6
450	0	4	7	12

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางจ.7 แสดงผลการเกิดควิเทชั่นที่กัณฑ์ชนิด 5 ใบพัด

อัตราไหล (ลิตร/นาทึ)	การเกิดควิเทชั่น (เปอร์เซ็นต์)			
	มุมปะทะ 20 (องศา)	มุมปะทะ 40 (องศา)	มุมปะทะ 60 (องศา)	มุมปะทะ 80 (องศา)
250	0	0	0	0
320	0	0	0	0
380	0	0	11	12
450	2	9	14	16

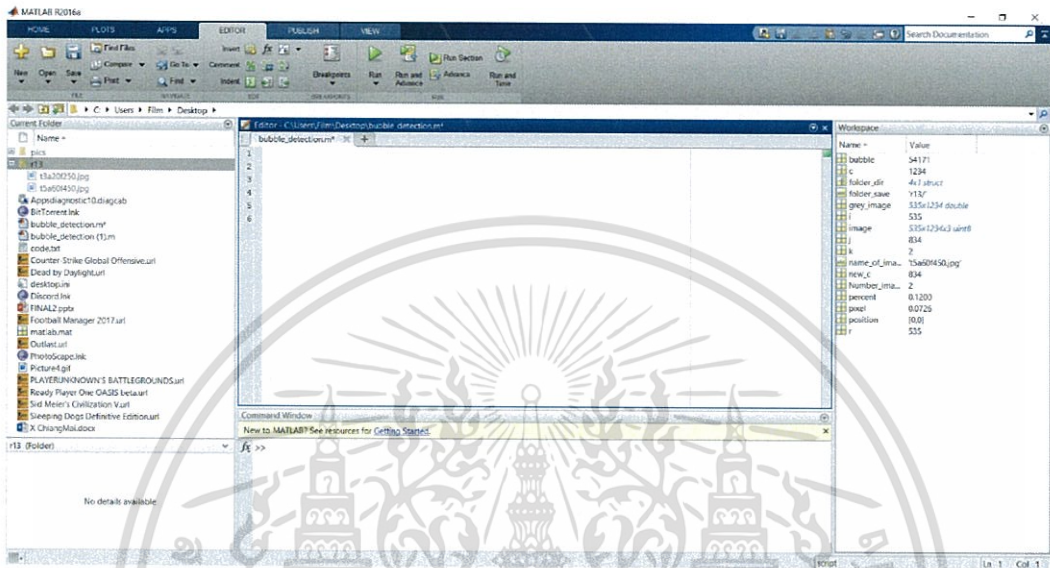


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ฉ.

## การใช้โปรแกรม MATLAB

## 1. เข้าสู่โปรแกรม MATLAB



รูปที่ ฉ.1 แสดงหน้าของการเริ่มต้นการใช้โปรแกรม MATLAB

## 2. เริ่มทำการเขียนโค้ดที่จะใช้สำหรับการรัน Image Processing



รูปที่ ฉ.2 แสดงการเริ่มเขียนโค้ดสำหรับการรัน Image Processing

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3. โค้ดที่ใช้ในการรัน Image Processing มีดังนี้

มีการปรับภาพจากสี RGB ให้เป็นรูปขาวดำเพื่อใช้สำหรับการทำ Image Processing คือ

```
grey_image = rgb2gray(image);
```

มีการปรับสเกลของแสงให้มีค่า 0-1 โดยใช้เทคนิค Normalization คือ

```
grey_image = mat2gray(grey_image);
```

มีการตั้งค่า Ratio เพื่อใช้ตรวจจับฟองอากาศที่เกิดขึ้นโดยที่เมื่อจุด pixel ที่ตรวจจับนั้นมีค่ามากกว่า Ratio ที่ได้ตั้งค่าเอาไว้ โปรแกรมจะทำการตรวจจับว่าจุดๆนั้นเป็นการเกิดฟองอากาศและทำการแต้มสีแดงที่จุดนั้นที่ภาพจริง คือ

```
pixel = grey_image(i,j);
```


```
if(pixel > 0.13)
```

```
image(i,j,:) = [255,0,0];
```

```
bubble = bubble + 1;
```

มีการหาพื้นที่การเกิดฟองอากาศจากพื้นที่ที่สนใจทั้งหมด คือ

```
percent = bubble/(r*new_c);
```



```
code - Notepad
File Edit Format View Help
clc;
clear;

folder_dir_dir('pics/');
number_images=length(folder_dir)-2;
folder_save = 'e13/';

for k=1:number_images
name_of_image = folder_dir(k+2).name;
image=imread(['pics/' name_of_image]);
grey_image = rgb2gray(image);
grey_image = mat2gray(grey_image);

[r,c] = size(grey_image);

bubble = 0;
new_c = c-240;
for i=1:(r)
for j=1:new_c
pixel = grey_image(i,j);
if(pixel > 0.13)
image(i,j,:) = [255,0,0];
bubble = bubble + 1;
end
end
end

percent = bubble/(r*new_c);
percent = round(percent*100)/100;
position = [0 0];

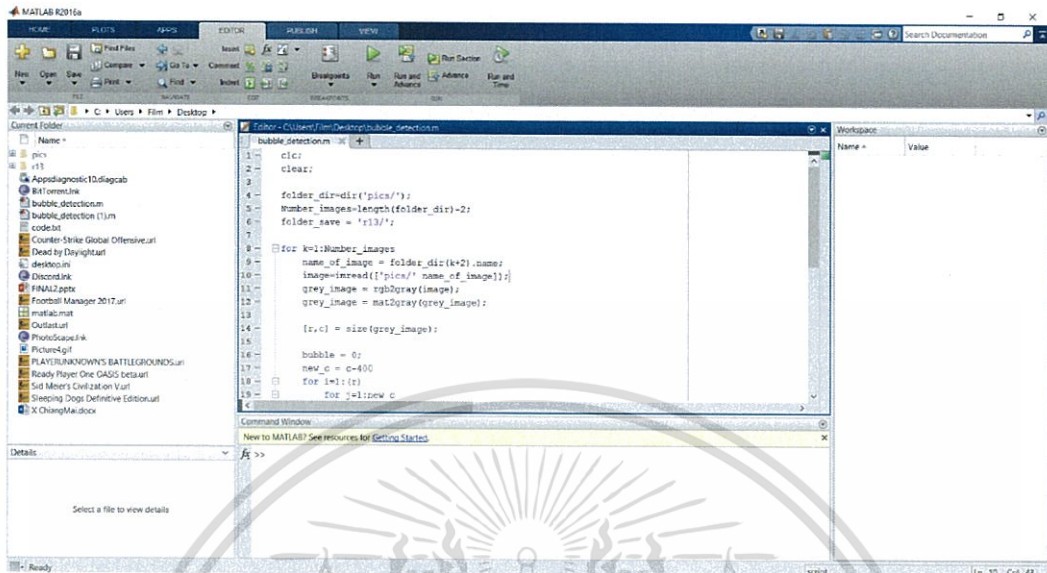
image = insertText(image,position,percent,'fontSize',18,'boxColor','yellow','boxOpacity',0.4,'textColor','white');

imwrite(image,[folder_save,name_of_image]);
end
```

รูป ๓.3 แสดงโค้ดที่ใช้ในการรัน Image Processing

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4. นำโค้ดที่ได้ทำการเขียนขึ้นมาไปใส่ในโปรแกรม MATLAB เพื่อใช้ในการรัน Image Processing



รูปที่ ๑.4 แสดงการนำโค้ดที่ได้ทำการเขียนมาใส่ในโปรแกรม MATLAB

5. ทำการกด Run เพื่อให้โปรแกรมได้ทำการรันโค้ดที่ได้ทำการเขียนขึ้นและนำรูปภาพที่ได้เตรียมไว้เข้า Image Processing โดยที่

folder\_dir=dir('pics/'); คือการใส่ชื่อของโฟลเดอร์ที่ได้ทำการเก็บรูปภาพไว้

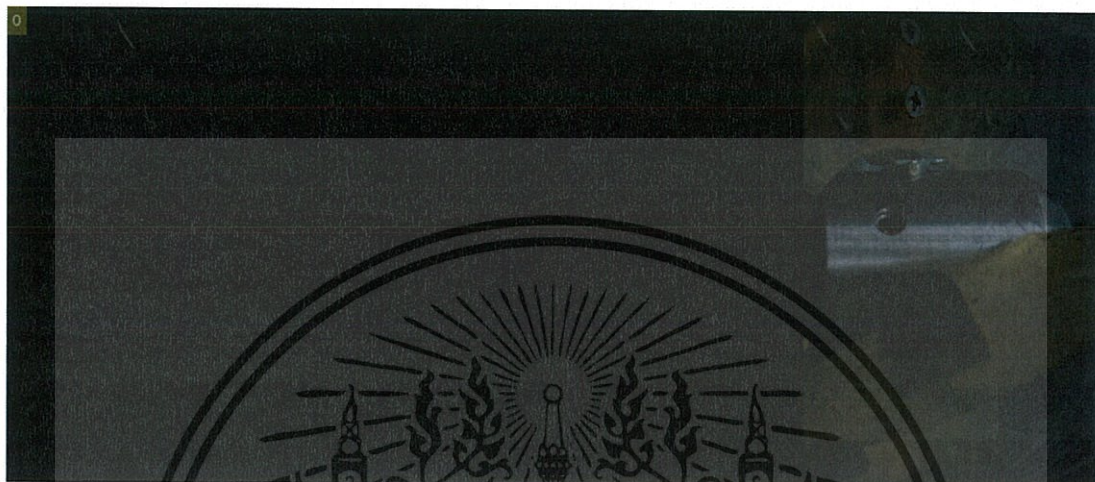
folder\_save = 'r13/'; คือชื่อของโฟลเดอร์ที่บันทึกรูปเมื่อทำการผ่าน Image Processing

6. หลังจาก กด Run โปรแกรมจะนำรูปเข้าขบวนการ Image Processing และรูปที่ได้จะอยู่ในโฟลเดอร์ที่ได้ทำการตั้งค่าเอาไว้

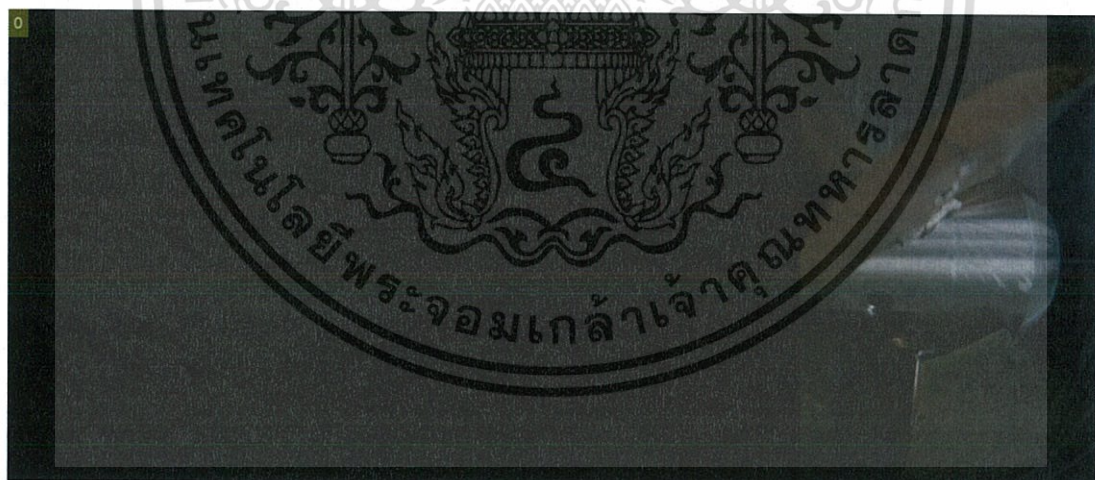
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข.

รูปภาพที่ได้จากการนำเข้าโปรแกรม Image Processing

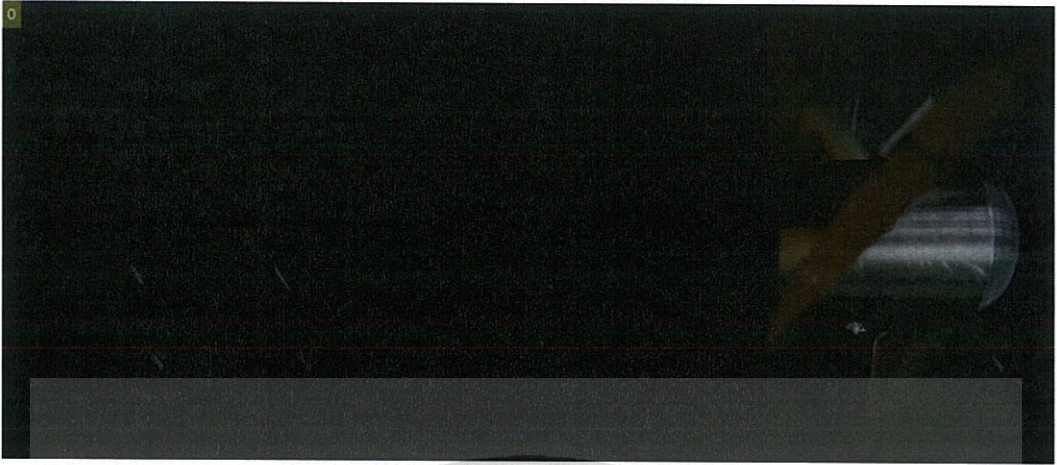


รูปที่ข.1 ที่อัตราไหล 250 ลิตรต่อนาที มุมปะทะ 20 องศา ชนิด 3 ใบพัด

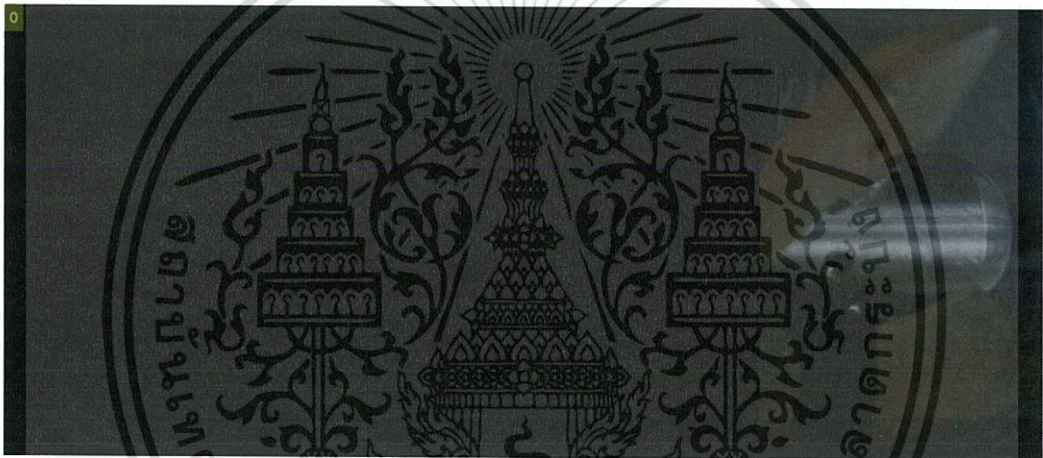


รูปที่ข.2 ที่อัตราไหล 320 ลิตรต่อนาที มุมปะทะ 20 องศา ชนิด 3 ใบพัด

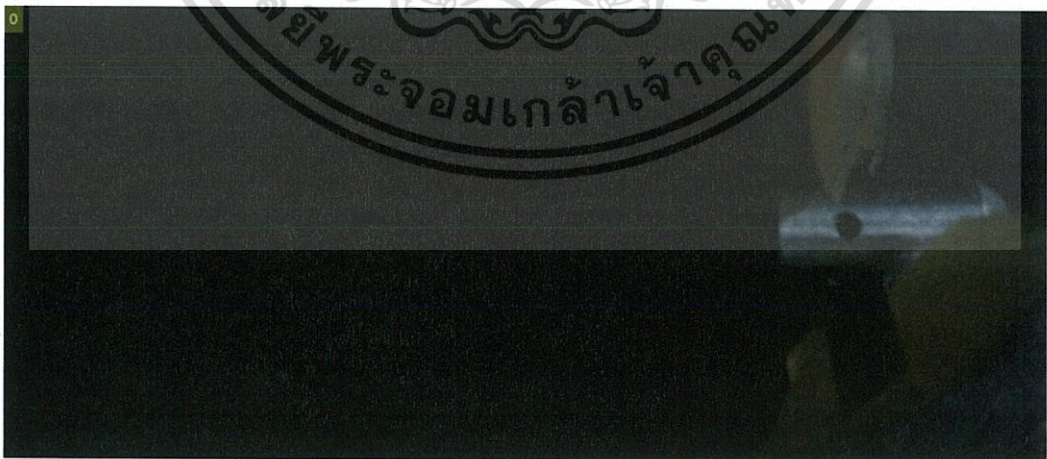
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ช.3 ที่อัตราไหล 380 ลิตรต่อนาที มุมปะทะ 20 องศา ชนิด 3 ใบพัด

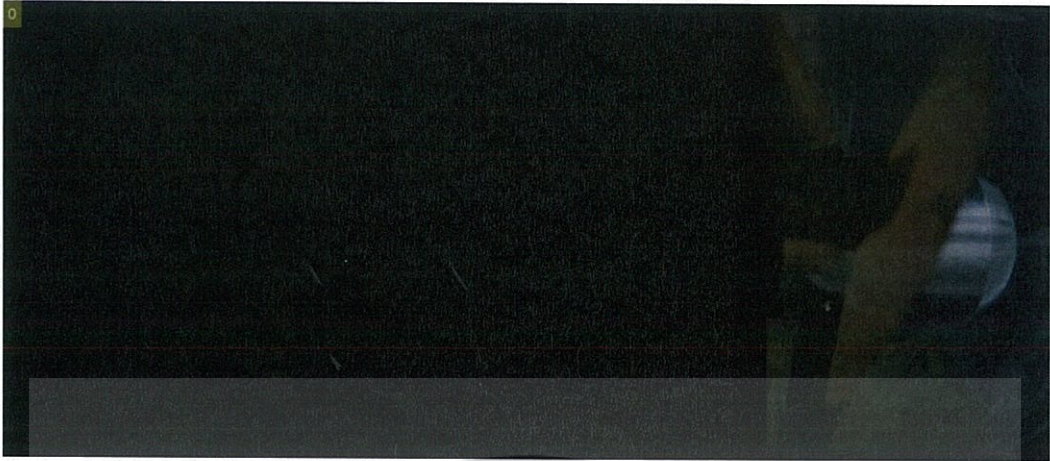


รูปที่ช.4 ที่อัตราไหล 450 ลิตรต่อนาที มุมปะทะ 20 องศา ชนิด 3 ใบพัด

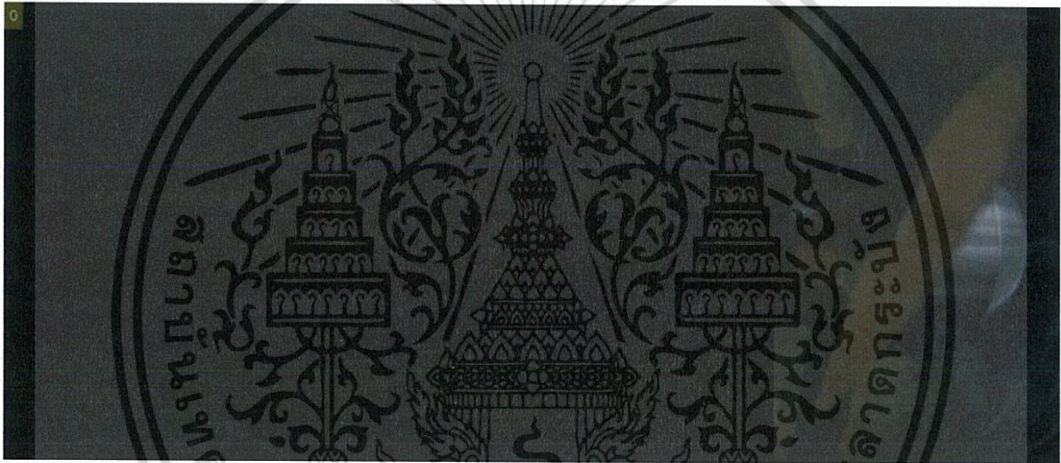


รูปที่ช.5 ที่อัตราไหล 250 ลิตรต่อนาที มุมปะทะ 40 องศา ชนิด 3 ใบพัด

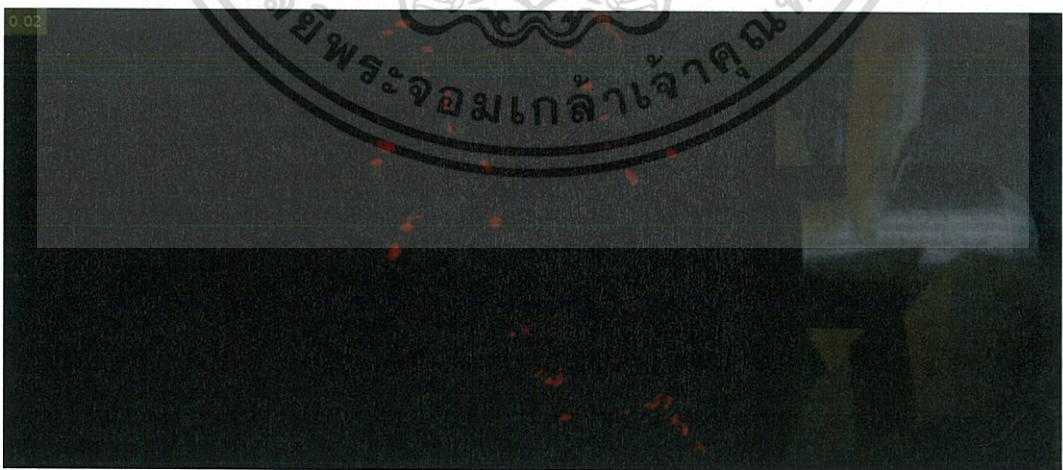
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ช.6 ที่อัตราไหล 320 ลิตรต่อนาที มุมปะทะ 40 องศา ชนิด 3 ใบพัด

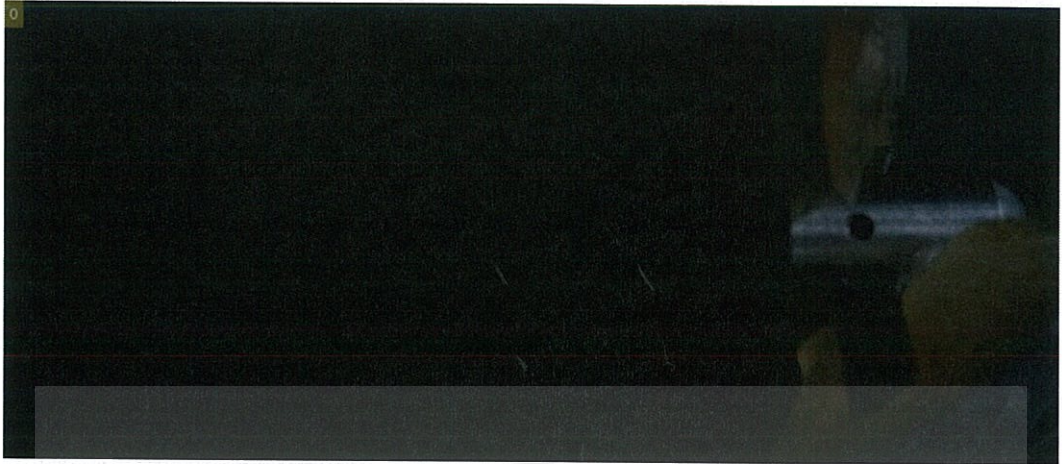


รูปที่ช.7 ที่อัตราไหล 380 ลิตรต่อนาที มุมปะทะ 40 องศา ชนิด 3 ใบพัด

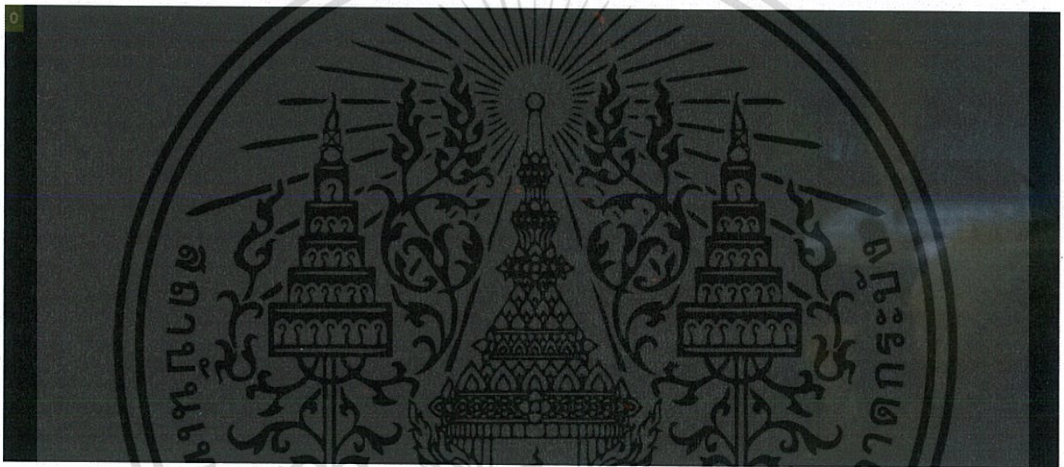


รูปที่ช.8 ที่อัตราไหล 450 ลิตรต่อนาที มุมปะทะ 40 องศา ชนิด 3 ใบพัด

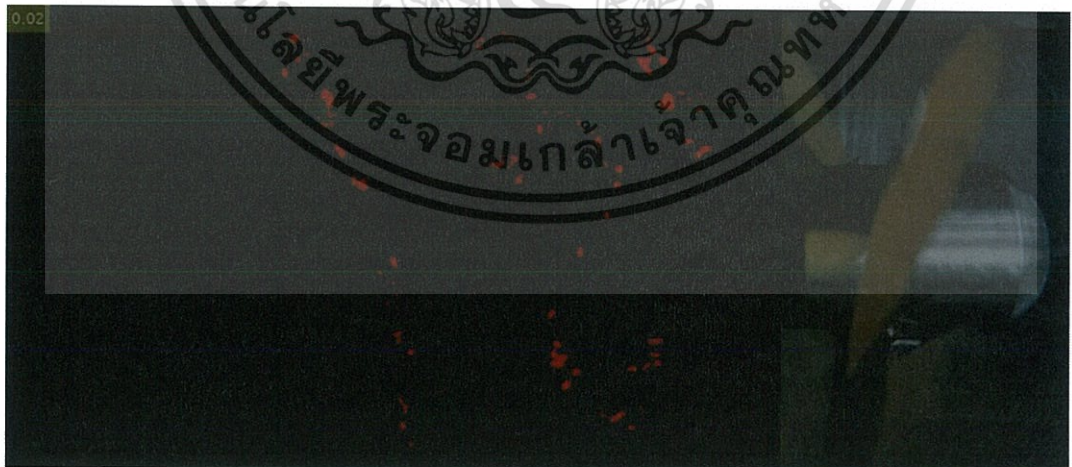
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ช.9 ที่อัตราไหล 250 ลิตรต่อนาที มุมปะทะ 60 องศา ชนิด 3 ใบพัด

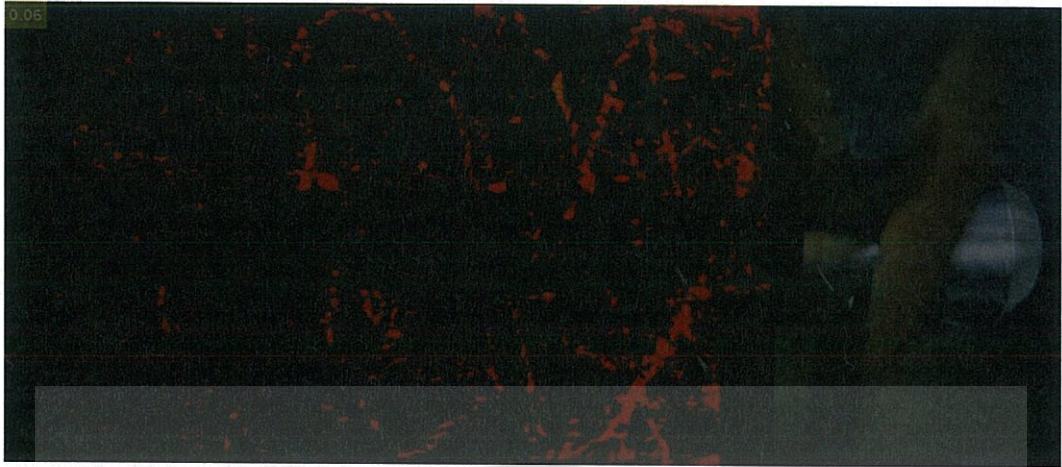


รูปที่ช.10 ที่อัตราไหล 320 ลิตรต่อนาที มุมปะทะ 60 องศา ชนิด 3 ใบพัด

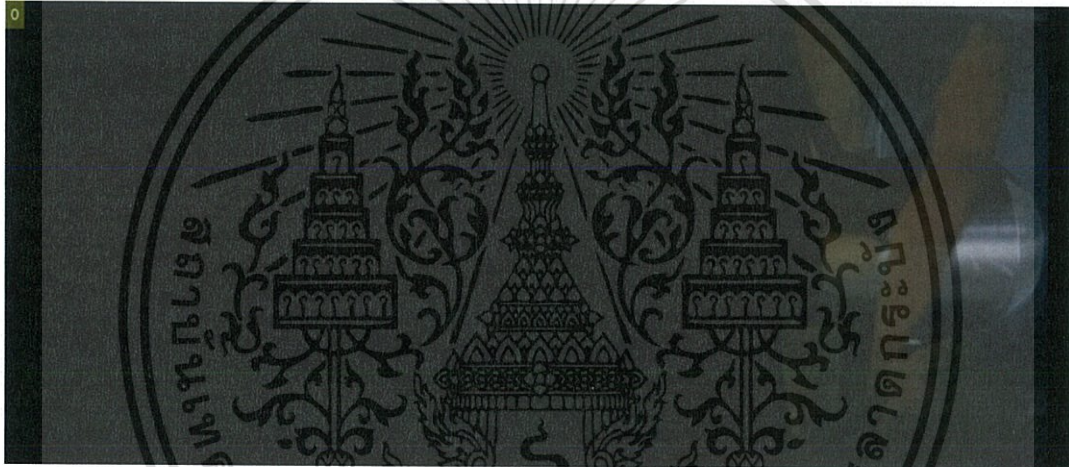


รูปที่ช.11 ที่อัตราไหล 380 ลิตรต่อนาที มุมปะทะ 60 องศา ชนิด 3 ใบพัด

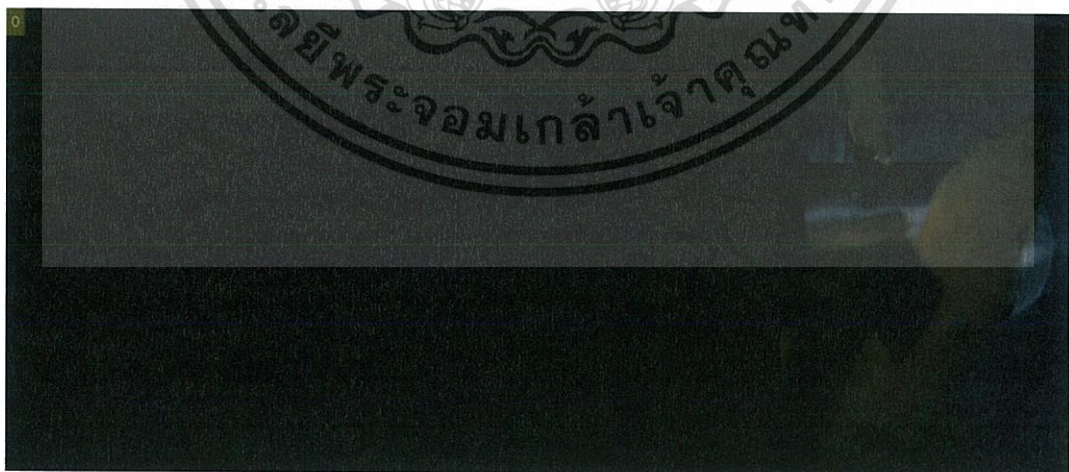
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ช.12 ที่อัตราไหล 450 ลิตรต่อนาที มุมปะทะ 60 องศา ชนิด 3 ใบพัด

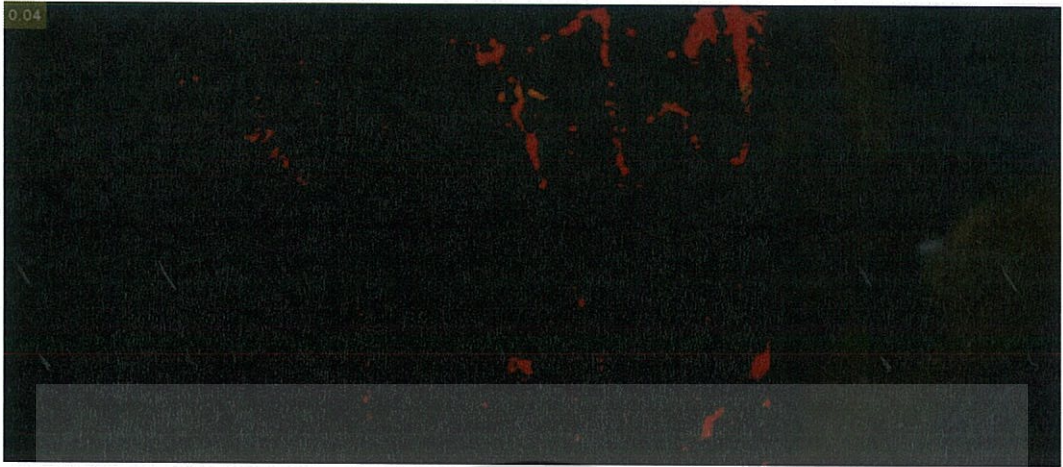


รูปที่ช.13 ที่อัตราไหล 250 ลิตรต่อนาที มุมปะทะ 80 องศา ชนิด 3 ใบพัด



รูปที่ช.14 ที่อัตราไหล 320 ลิตรต่อนาที มุมปะทะ 80 องศา ชนิด 3 ใบพัด

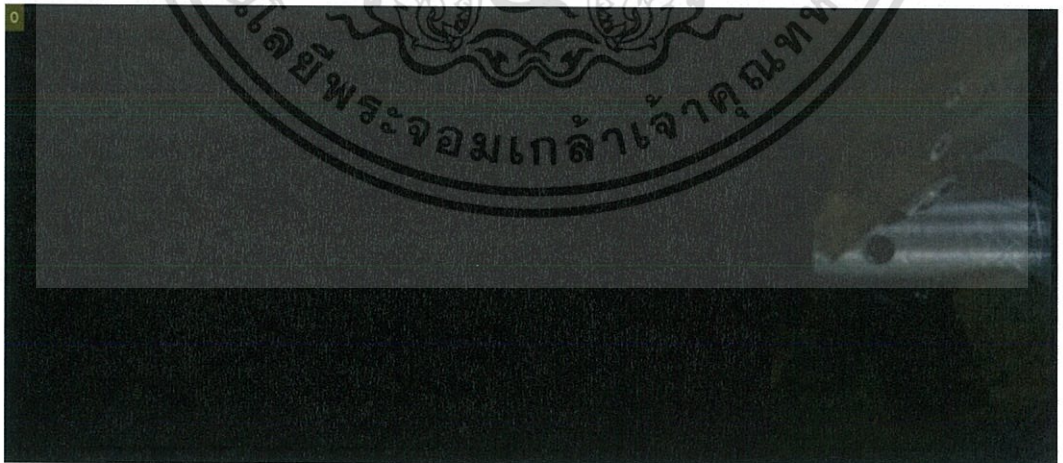
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ช.15 ที่อัตราไหล 380 ลิตรต่อนาที มุมปะทะ 80 องศา ชนิด 3 ใบพัด

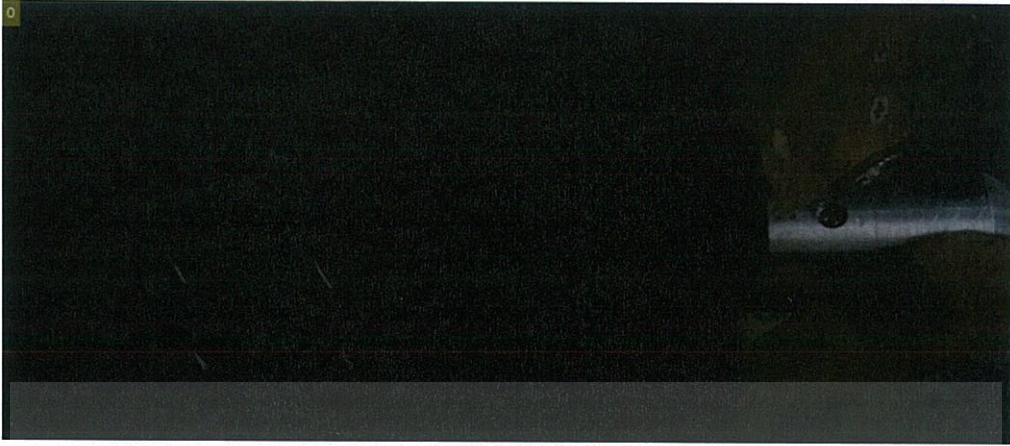


รูปที่ช.16 ที่อัตราไหล 450 ลิตรต่อนาที มุมปะทะ 80 องศา ชนิด 3 ใบพัด



รูปที่ช.17 ที่อัตราไหล 250 ลิตรต่อนาที มุมปะทะ 20 องศา ชนิด 4 ใบพัด

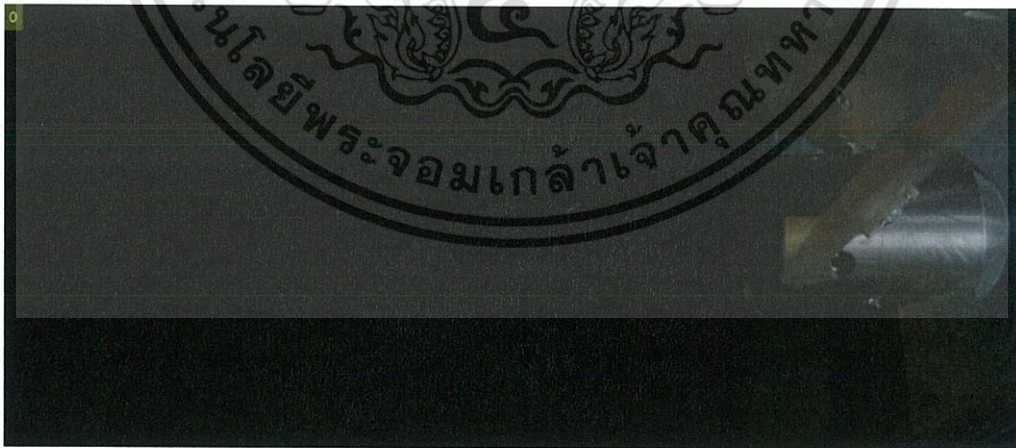
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ช.18 ที่อัตราไหล 320 ลิตรต่อนาที มุมปะทะ 20 องศา ชนิด 4 ใบพัด



รูปที่ช.19 ที่อัตราไหล 380 ลิตรต่อนาที มุมปะทะ 20 องศา ชนิด 4 ใบพัด

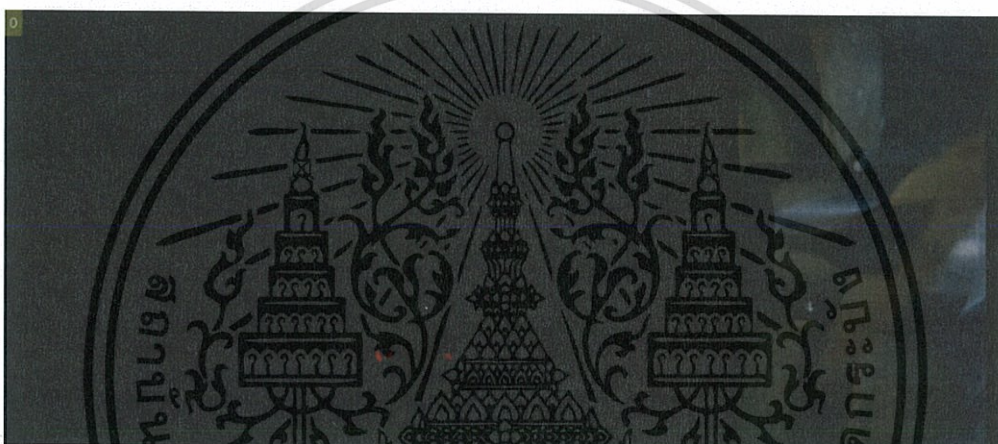


รูปที่ช.20 ที่อัตราไหล 450 ลิตรต่อนาที มุมปะทะ 20 องศา ชนิด 4 ใบพัด

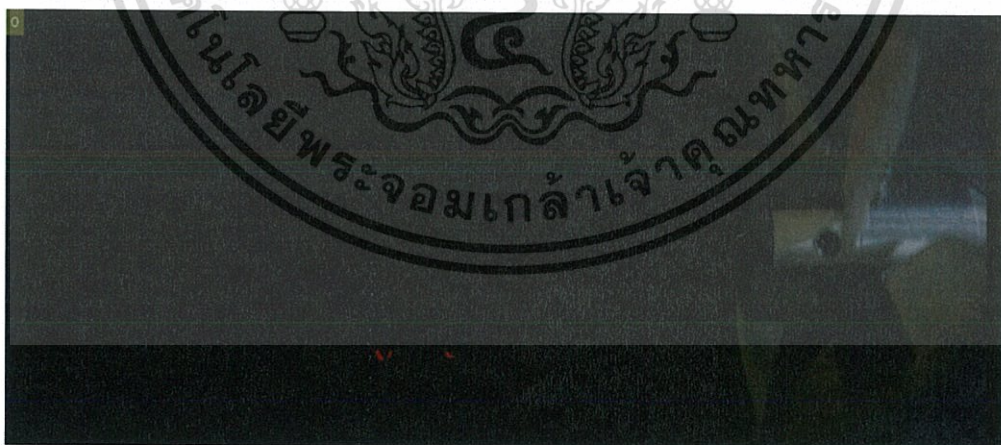
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ช.21 ที่อัตราไหล 250 ลิตรต่อนาที มุมปะทะ 40 องศา ชนิด 4 ใบพัด

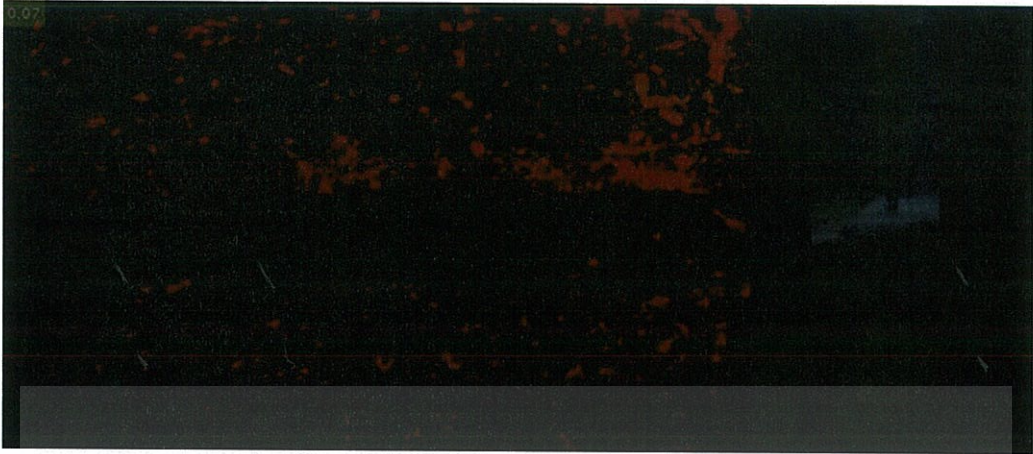


รูปที่ช.22 ที่อัตราไหล 320 ลิตรต่อนาที มุมปะทะ 40 องศา ชนิด 4 ใบพัด

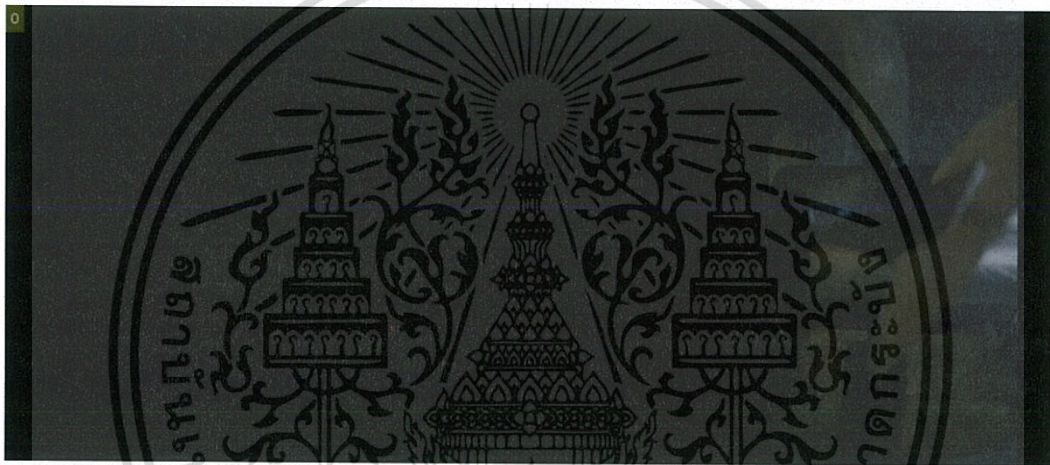


รูปที่ช.23 ที่อัตราไหล 380 ลิตรต่อนาที มุมปะทะ 40 องศา ชนิด 4 ใบพัด

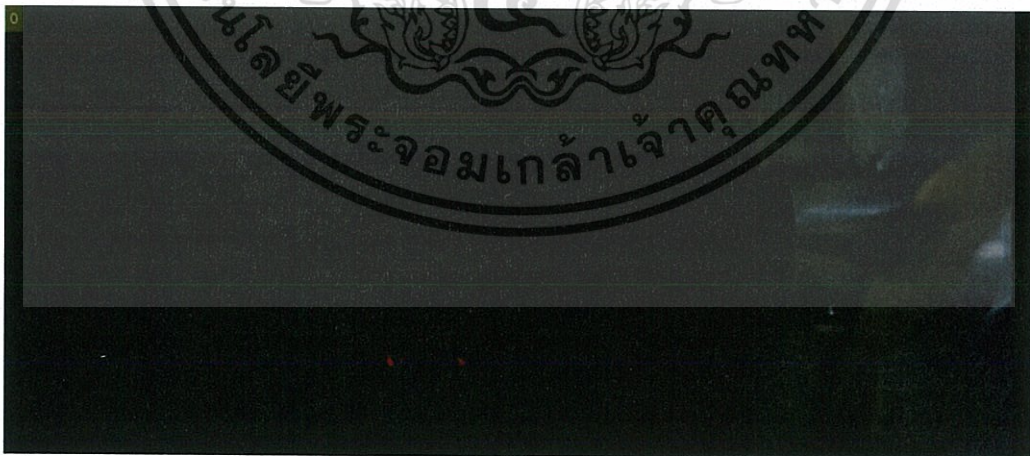
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ช.24 ที่อัตราไหล 450 ลิตรต่อนาที มุมปะทะ 40 องศา ชนิด 4 ใบพัด



รูปที่ช.25 ที่อัตราไหล 250 ลิตรต่อนาที มุมปะทะ 60 องศา ชนิด 4 ใบพัด



รูปที่ช.26 ที่อัตราไหล 320 ลิตรต่อนาที มุมปะทะ 60 องศา ชนิด 4 ใบพัด

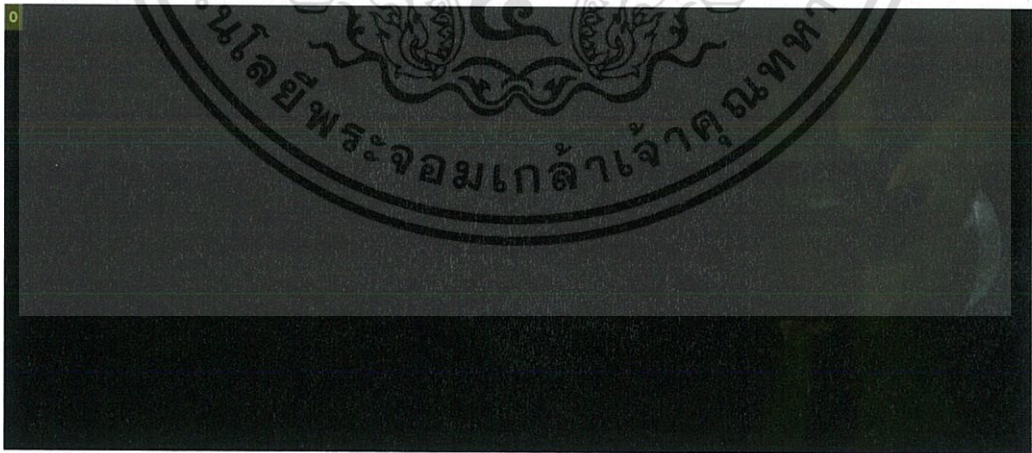
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ช.27 ที่อัตราไหล 380 ลิตรต่อนาที มุมปะทะ 60 องศา ชนิด 4 ใบพัด

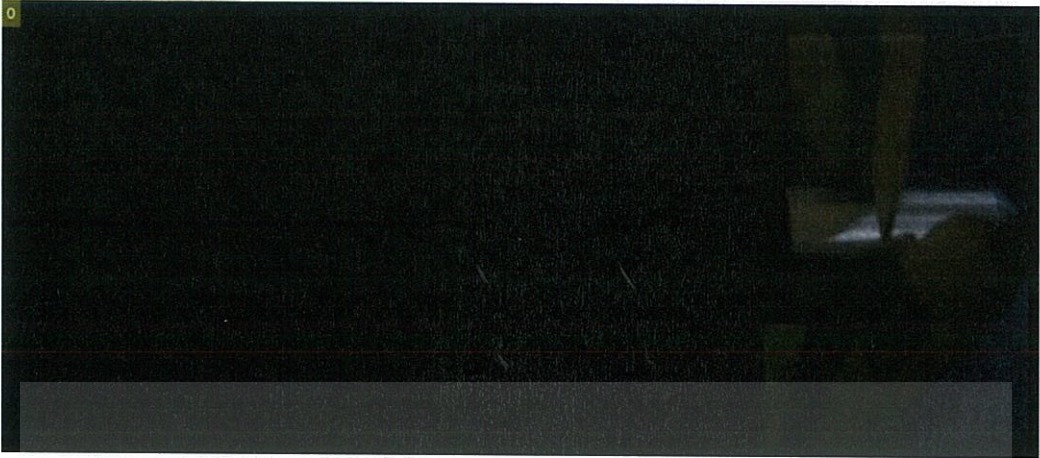


รูปที่ช.28 ที่อัตราไหล 450 ลิตรต่อนาที มุมปะทะ 60 องศา ชนิด 4 ใบพัด



รูปที่ช.29 ที่อัตราไหล 250 ลิตรต่อนาที มุมปะทะ 80 องศา ชนิด 4 ใบพัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ช.30 ที่อัตราไหล 320 ลิตรต่อนาที มุมปะทะ 80 องศา ชนิด 4 ใบพัด

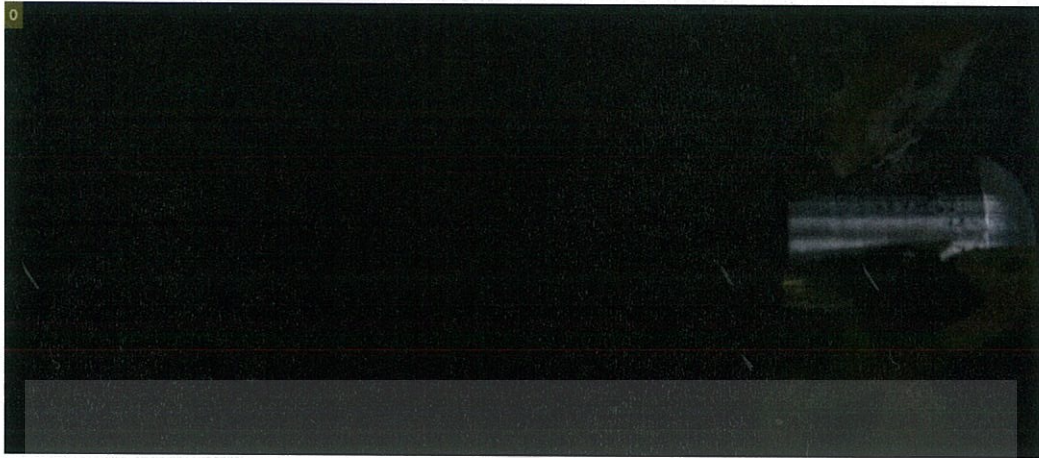


รูปที่ช.31 ที่อัตราไหล 380 ลิตรต่อนาที มุมปะทะ 80 องศา ชนิด 4 ใบพัด

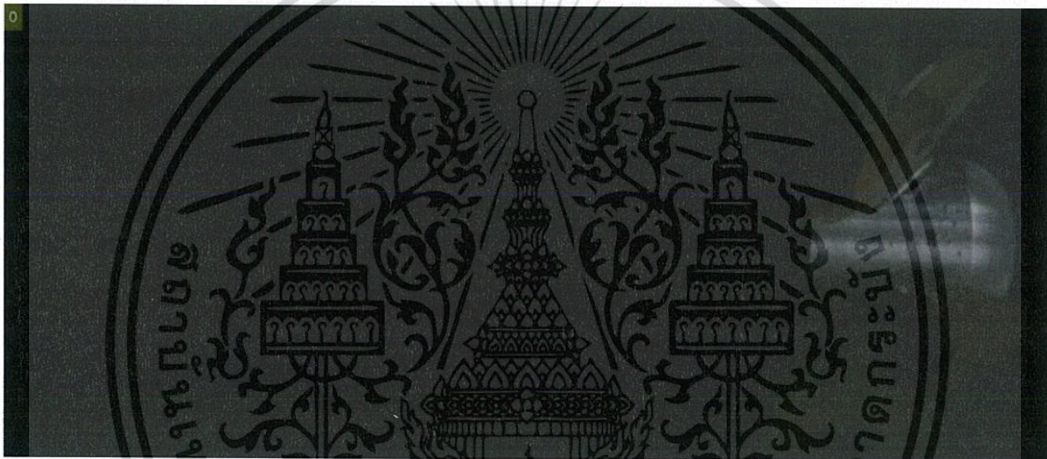


รูปที่ช.32 ที่อัตราไหล 450 ลิตรต่อนาที มุมปะทะ 80 องศา ชนิด 4 ใบพัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ช.33 ที่อัตราไหล 250 ลิตรต่อนาที มุมปะทะ 20 องศา ชนิด 5 ใบพัด



รูปที่ช.34 ที่อัตราไหล 320 ลิตรต่อนาที มุมปะทะ 20 องศา ชนิด 5 ใบพัด

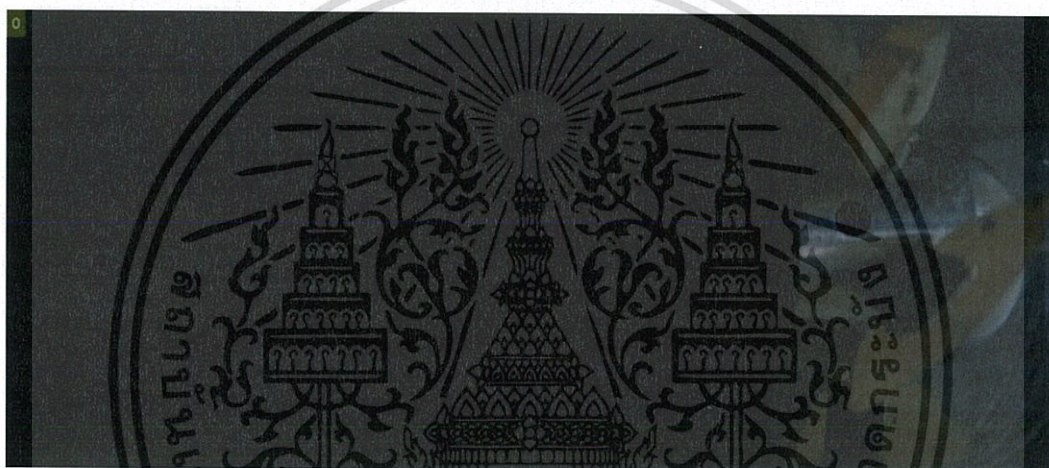


รูปที่ช.35 ที่อัตราไหล 380 ลิตรต่อนาที มุมปะทะ 20 องศา ชนิด 5 ใบพัด

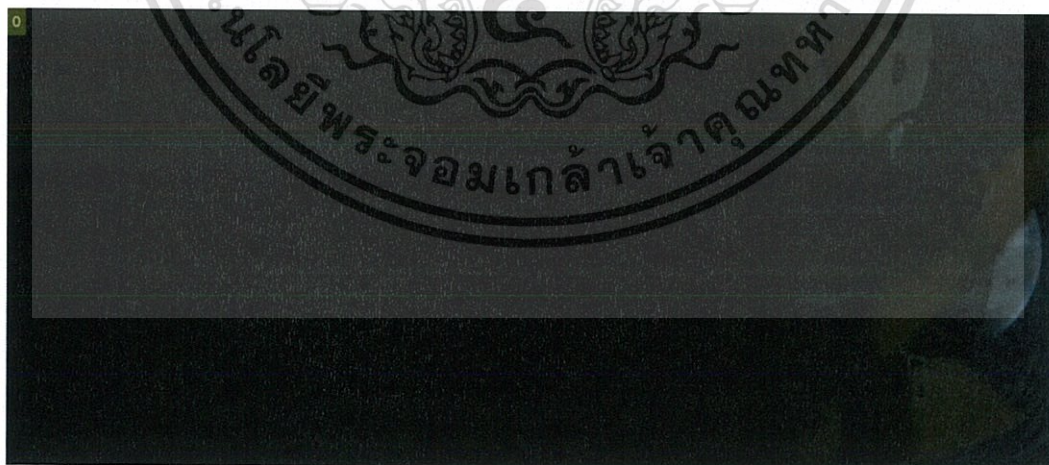
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ช.36 ที่อัตราไหล 450 ลิตรต่อนาที มุมปะทะ 20 องศา ชนิด 5 ใบพัด

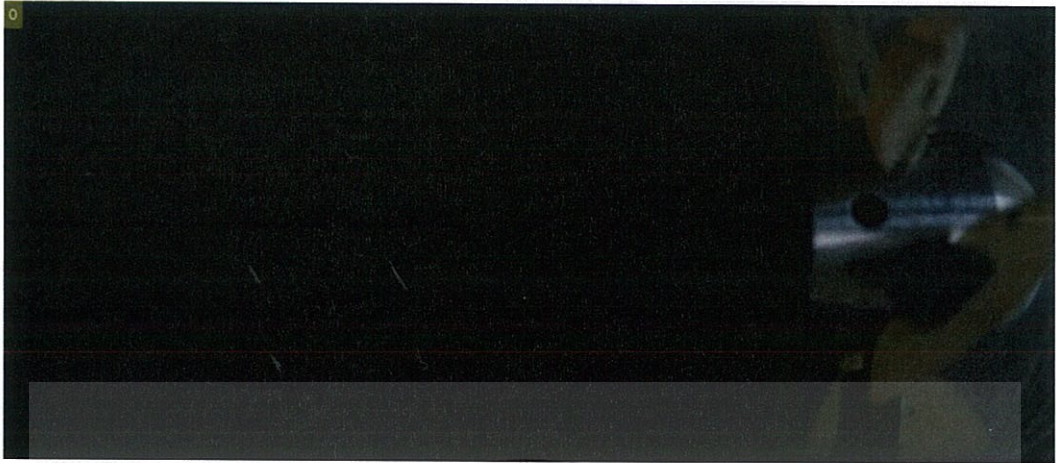


รูปที่ช.37 ที่อัตราไหล 250 ลิตรต่อนาที มุมปะทะ 40 องศา ชนิด 5 ใบพัด



รูปที่ช.38 ที่อัตราไหล 320 ลิตรต่อนาที มุมปะทะ 40 องศา ชนิด 5 ใบพัด

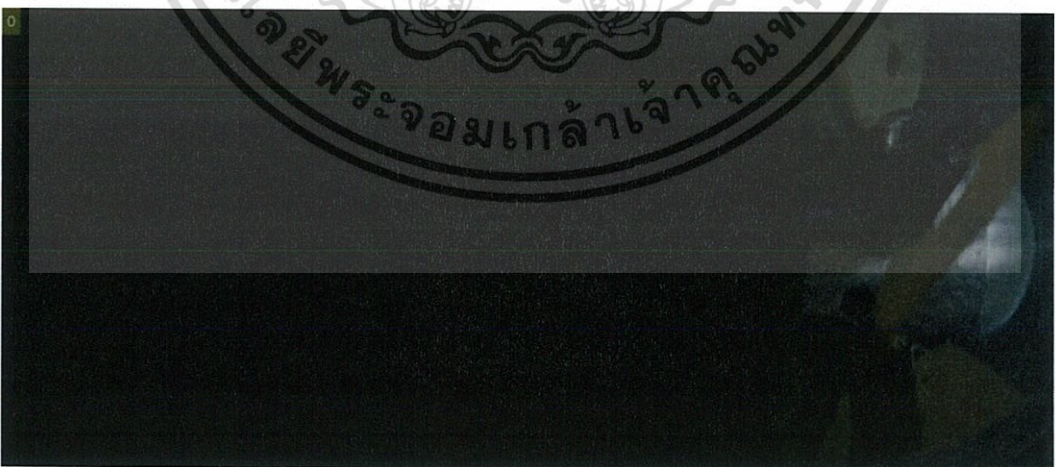
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ช.39 ที่อัตราไหล 380 ลิตรต่อนาที มุมปะทะ 40 องศา ชนิด 5 ใบพัด

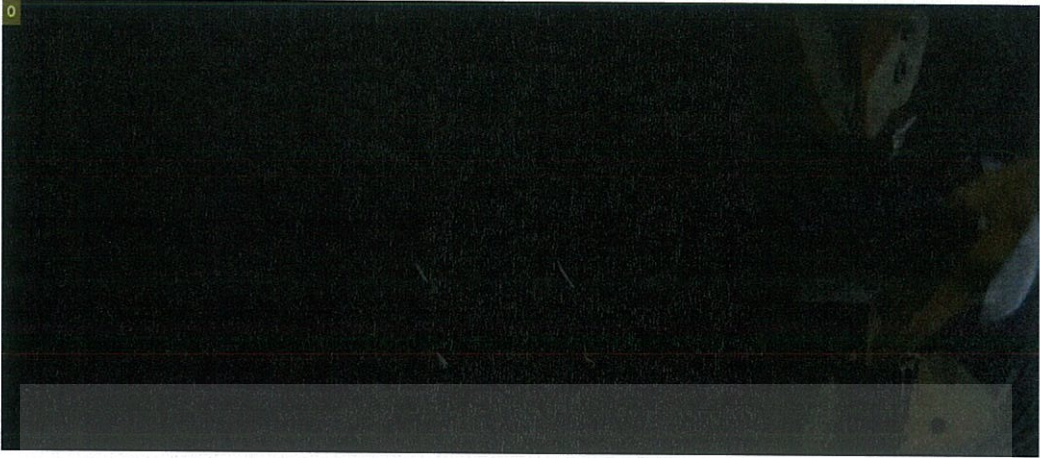


รูปที่ช.40 ที่อัตราไหล 450 ลิตรต่อนาที มุมปะทะ 40 องศา ชนิด 5 ใบพัด



รูปที่ช.41 ที่อัตราไหล 250 ลิตรต่อนาที มุมปะทะ 60 องศา ชนิด 5 ใบพัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ช.42 ที่อัตราไหล 320 ลิตรต่ออนาที มุมปะทะ 60 องศา ชนิด 5 ใบพัด

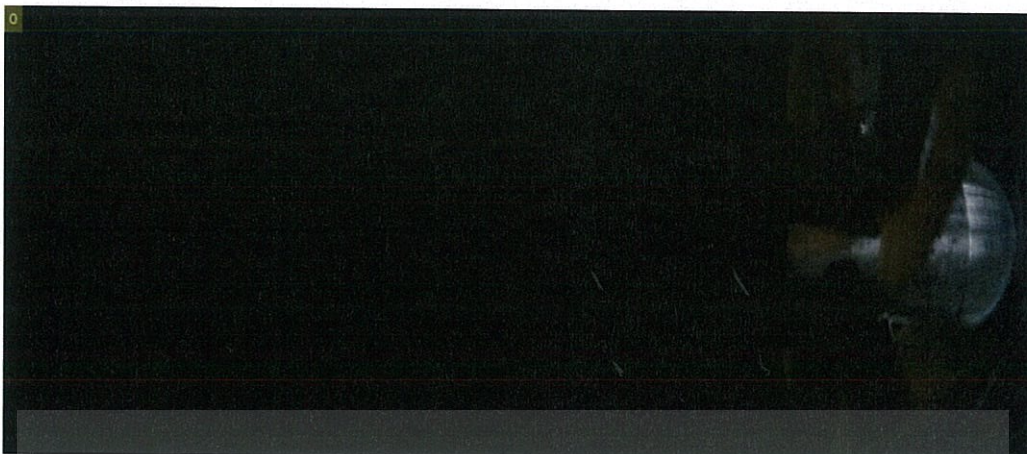


รูปที่ช.43 ที่อัตราไหล 380 ลิตรต่ออนาที มุมปะทะ 60 องศา ชนิด 5 ใบพัด



รูปที่ช.44 ที่อัตราไหล 450 ลิตรต่ออนาที มุมปะทะ 60 องศา ชนิด 5 ใบพัด

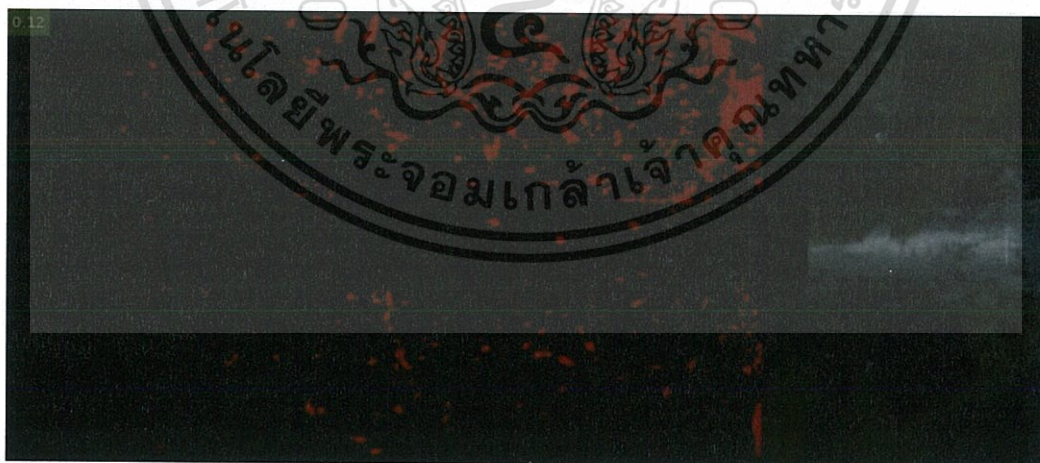
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ช.45 ที่อัตราไหล 250 ลิตรต่อนาที มุมปะทะ 80 องศา ชนิด 5 ใบพัด

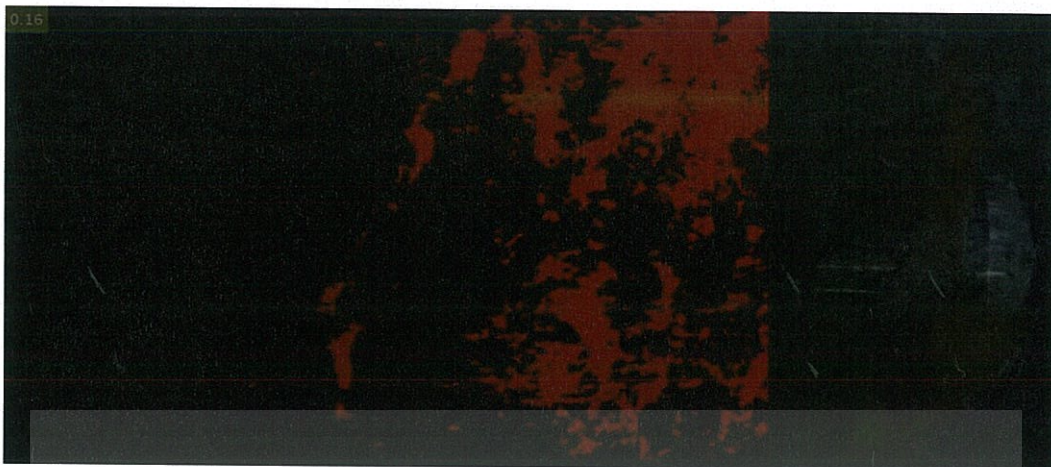


รูปที่ช.46 ที่อัตราไหล 320 ลิตรต่อนาที มุมปะทะ 80 องศา ชนิด 5 ใบพัด



รูปที่ช.47 ที่อัตราไหล 380 ลิตรต่อนาที มุมปะทะ 80 องศา ชนิด 5 ใบพัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ช.48 ที่อัตราไหล 450 ลิตรต่อนาที มุมปะทะ 80 องศา ชนิด 5 ใบพัด



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ซ.

## เปรียบเทียบการเกิดคาวิเทชันจากราคำนวนและทดลอง

ตารางที่ ซ.1 เปรียบเทียบค่า Cavitation number และ Cavitation critical ที่ได้จากการคำนวณ และการทดลองซึ่งวิเคราะห์โดยใช้โปรแกรม Image Processing ที่อัตราการไหลต่างๆ และมุมปะทะต่างๆ ของกังหันชนิด 3 ใบพัด

Flow rate (L/s)	Angle of attack (degree)	Cavitation number	Cavitation critical	Predict	Experiment	Cavitation (Percent)
250	20	116.43	0.310	ไม่เกิด	ไม่เกิด	0
	40	22.940	0.460	ไม่เกิด	ไม่เกิด	0
	60	7.675	2.252	ไม่เกิด	ไม่เกิด	0
	80	5.506	2.445	ไม่เกิด	ไม่เกิด	0
320	20	103.94	0.310	ไม่เกิด	ไม่เกิด	0
	40	18.820	0.570	ไม่เกิด	ไม่เกิด	0
	60	6.200	4.381	ไม่เกิด	ไม่เกิด	0
	80	3.360	12.063	เกิด	ไม่เกิด	0
380	20	100.788	0.310	ไม่เกิด	ไม่เกิด	0
	40	18.340	0.658	ไม่เกิด	ไม่เกิด	0
	60	6.170	5.110	ไม่เกิด	เกิด	2
	80	3.170	17.237	เกิด	เกิด	4
450	20	155.900	0.309	ไม่เกิด	ไม่เกิด	0
	40	21.320	0.577	ไม่เกิด	เกิด	2
	60	6.390	5.471	ไม่เกิด	เกิด	6
	80	3.360	18.774	เกิด	เกิด	11

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.2 เปรียบเทียบค่า Cavitation number และ Cavitation critical ที่ได้จากการคำนวณ และการทดลองซึ่งวิเคราะห์โดยใช้โปรแกรม Image Processing ที่อัตราการไหลต่างๆ และมุมปะทะต่างๆ ของกังหันชนิด 4 ใบพัด

Flow rate (L/s)	Angle of attack (degree)	Cavitation number	Cavitation critical	Predict	Experiment	Cavitation (Percent)
250	20	134.133	0.310	ไม่เกิด	ไม่เกิด	0
	40	19.840	0.471	ไม่เกิด	ไม่เกิด	0
	60	8.877	2.7112	ไม่เกิด	ไม่เกิด	0
	80	4.440	11.731	เกิด	ไม่เกิด	0
320	20	142.951	0.31	ไม่เกิด	ไม่เกิด	0
	40	17.474	0.571	ไม่เกิด	ไม่เกิด	0
	60	7.220	4.812	ไม่เกิด	ไม่เกิด	0
	80	3.332	26.007	เกิด	ไม่เกิด	0
380	20	180.76	0.309	ไม่เกิด	ไม่เกิด	0
	40	27.084	0.490	ไม่เกิด	ไม่เกิด	0
	60	7.201	5.750	ไม่เกิด	เกิด	4
	80	3.173	34.715	เกิด	เกิด	6
450	20	237.57	0.308	ไม่เกิด	ไม่เกิด	0
	40	19.990	0.730	ไม่เกิด	เกิด	4
	60	7.613	5.817	ไม่เกิด	เกิด	7
	80	3.251	37.870	เกิด	เกิด	12

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.3 เปรียบเทียบค่า Cavitation number และ Cavitation critical ที่ได้จากการคำนวณ และการทดลองซึ่งวิเคราะห์โดยใช้โปรแกรม Image Processing ที่อัตราการไหลต่างๆ และมุมปะทะต่างๆ ของกังหันชนิด 5 ใบพัด

Flow rate (L/s)	Angle of attack (degree)	Cavitation number	Cavitation critical	Predict	Experiment	Cavitation Occurs (Percent)
250	20	110.620	0.310	ไม่เกิด	ไม่เกิด	0
	40	29.031	0.473	ไม่เกิด	ไม่เกิด	0
	60	9.031	3.409	ไม่เกิด	ไม่เกิด	0
	80	4.733	13.025	เกิด	ไม่เกิด	0
320	20	123.490	0.309	ไม่เกิด	ไม่เกิด	0
	40	29.570	0.443	ไม่เกิด	ไม่เกิด	0
	60	7.383	6.346	ไม่เกิด	ไม่เกิด	0
	80	3.986	22.838	เกิด	ไม่เกิด	0
380	20	152.336	0.309	ไม่เกิด	ไม่เกิด	0
	40	32.608	0.428	ไม่เกิด	ไม่เกิด	0
	60	7.315	8.069	เกิด	เกิด	11
	80	3.833	29.479	เกิด	เกิด	12
450	20	212.75	0.308	ไม่เกิด	เกิด	2
	40	36.683	0.396	ไม่เกิด	เกิด	9
	60	7.740	8.519	เกิด	เกิด	14
	80	3.880	29.838	เกิด	เกิด	16

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้