

การควบคุมความดันสำหรับการวัดอัตราการไหล
PRESSURE CONTROLLING SYSTEMS
FOR GAS FLOW RATE MEASUREMENT



โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต (ฟิสิกส์ประยุกต์)
ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2559

การควบคุมความดันสำหรับการวัดอัตราการไหล
PRESSURE CONTROLLING SYSTEMS
FOR GAS FLOW RATE MEASUREMENT



T149467



กรณีการ แก่นจันทร์
กานต์ธิดา แผ้วพลสง
ณัฐวิโรจน์ สมใจเจริญ

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน 149467
วันเดือนปี ๗ ๘ อ.ค. 2561

b. 12884704
i.

โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต (ฟิสิกส์ประยุกต์)
" ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ ปีการศึกษา 2559 ไม่นุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

PRESSURE CONTROLLING SYSTEMS FOR GAS FLOW RATE MEASUREMENT



KANNIKA KAENCHAN
KANTIDA PAEOPONGSONG
NATTHAWIROT SOMJAIJAROEN

A SPECIAL PROJECT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF
THE REQUIREMENT FOR
THE DEGREE OF BACHELOR OF SCIENCE (APPLIED PHYSICS)
DEPARTMENT OF PHYSICS, FACULTY OF SCIENCE
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
ACADEMIC YEAR 2016

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ การควบคุมความดันสำหรับการวัดอัตราการไหล
 Pressure Controlling Systems for Gas Flow Rate Measurement

ชื่อนักศึกษา นางสาวกรรณิการ์ แก่นจันทร์ รหัสนักศึกษา 56051111
 นางสาวกานต์ธิดา แผ้วพลสง รหัสนักศึกษา 56051115
 นายณัฐวิโรจน์ สมใจเจริญ รหัสนักศึกษา 56051139

ปริญญา วิทยาศาสตร์บัณฑิต (ฟิสิกส์ประยุกต์)
 ภาควิชา ฟิสิกส์
 คณะ วิทยาศาสตร์
 มหาวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง (สจล.)
 ปีการศึกษา 2559
 อาจารย์ที่ปรึกษา รศ.วิชาญ เตชิตธีระ

คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง (สจล.)
 อนุมัติให้โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต
 (ฟิสิกส์ประยุกต์) ประจำปีการศึกษา 2559

คณะกรรมการสอบ	ลายมือชื่อ
ผศ.ดร.กฤษกร โล่เจริญรัตน์ ประธานกรรมการ	
ดร.พิชชานันท์ อีเศรษฐ์ไศภณ กรรมการ	
อ.ธนภรณ์ สีสาววัฒนานนท์ กรรมการ	
รศ.วิชาญ เตชิตธีระ กรรมการและอาจารย์ที่ปรึกษา	

ลิขสิทธิ์ของคณะวิทยาศาสตร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ	การควบคุมความดันสำหรับการวัดอัตราการไหล	
ชื่อนักศึกษา	นางสาวกรรณิการ์ แก่นจันทร์	รหัสนักศึกษา 56051111
	นางสาวกานต์ธิดา แผ้วพลสง	รหัสนักศึกษา 56051115
	นายณัฐวิโรจน์ สมใจเจริญ	รหัสนักศึกษา 56051139
ปริญญา	วิทยาศาสตร์บัณฑิต (ฟิสิกส์ประยุกต์)	
ภาควิชา	ฟิสิกส์	
คณะ	วิทยาศาสตร์	
มหาวิทยาลัย	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง (สจล.)	
ปีการศึกษา	2559	
อาจารย์ที่ปรึกษา	รศ.วิชาญ เตชิตธีระ	

บทคัดย่อ

โครงการพิเศษนี้คณะผู้จัดทำมีวัตถุประสงค์เพื่อจะออกแบบและสร้างเครื่องมือวัดเพื่อควบคุมอัตราการไหลของก๊าซไนโตรเจน ซึ่งเป็นเครื่องมือที่สามารถเลือกหรือควบคุมอัตราการไหลของก๊าซไนโตรเจนได้โดยอัตโนมัติ โดยทั่วไปแล้วการควบคุมอัตราการไหลของก๊าซเพื่อทำการทดลอง เช่น การใช้เตาเผา นั้นเป็นการควบคุมอัตราการไหลแบบหยาบ ซึ่งไม่สามารถระบุค่าที่ชัดเจนของอัตราการไหลของก๊าซในการทดลองได้ ดังนั้น คณะผู้จัดทำโครงการพิเศษนี้จึงได้ทำการออกแบบและสร้างเครื่องมือวัดอัตราการไหลของก๊าซเพื่อควบคุมอัตราการไหลขึ้นมา เพื่อที่จะได้สามารถกำหนดอัตราการไหลให้คงที่ตลอดทดลอง และสร้างเครื่องมือวัดนี้ได้ นำไมโครคอนโทรลเลอร์ชนิด Arduino UNO R3 ซึ่งมีฟังก์ชันในการใช้งานหลากหลาย ซึ่งเครื่องมือวัดที่ออกแบบจะใช้ Arduino UNO R3 ควบคุมเครื่องมือ 2 ส่วน คือ ส่วนที่ 1 ควบคุมสเต็ปเปอร์มอเตอร์ เพื่อควบคุมอัตราการไหลของวาล์วควบคุม และ ส่วนที่ 2 เพื่ออ่านค่าผลต่างของความดันและนำไปแสดงผลบนจอแสดงผล (LCD) ของตัวเซ็นเซอร์ตรวจจับผลต่างของความดัน (Differential Pressure Sensor : SDP611) ซึ่งหลักการควบคุมการทำงานแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ เมื่อก๊าซไหลผ่านตัวเซ็นเซอร์ตรวจจับผลต่างของความดัน จะวัดผลต่างของความดันและรับ-ส่งค่า เพื่อสั่งการให้สเต็ปเปอร์มอเตอร์มีการหมุนควบคุมวาล์วควบคุมแทนการหมุนด้วยมือ

คำสำคัญ : เครื่องมือวัดอัตราการไหล ทฤษฎีของแบร์นูลลี ท่อเวนทูรี ผลต่างของความดัน

Title	Pressure Controlling Systems for Gas Flow Rate Measurement
Students	Miss Kannika Kaenchan Student ID 56051111 Miss Kantida Paeoponsong Student ID 56051115 Mr. Natthawiroth Somjaijaroen Student ID 56051139
Degree	Bachelor of Science (Applied Physics)
Department	Physics
Faculty	Science
University	King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang (KMITL)
Academic Year	2016
Advisor	Assoc.Prof. Wicharn Techitdheera

Abstract

This special project has a purpose to design and construct a measuring instrument to control the flow of Nitrogen Gas. It is a tool that automatically selects or controls the flow rate of Nitrogen Gas. Normally, gas flow control for an oven is rough. Therefore, it cannot specify the clear value of the gas flow rate in the experiment. So, the providers have designed and built a flow meter to control the flow rate in order to keep the flow rate constant throughout the experiment. The creation of this instrument has used Arduino UNO R3 Microcontroller, which has a wide range of functionalities. This measuring instrument uses the Arduino UNO R3 controller in 2 parts. Part 1 controls stepper motor for controlling the flow rate of the valve. Part 2 is for reading value to show on the display, which is the result of Differential Pressure Sensor (SDP611). Both parts will operate only when the gas flows through Differential Pressure Sensor. The sensor can measure the differential pressure and receive - send value to command stepper motor rotation by connecting to the valve.

Keywords : Flow rate measurement, Bernoulli's theorem, Venturi tube, Differential Pressure

กิตติกรรมประกาศ

โครงการพิเศษฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี เนื่องมาจากความกรุณาและความร่วมมือของทุกๆท่าน ขอขอบพระคุณ รศ.วิชาญ เตชิตธีระ ที่คอยให้คำปรึกษาดูแลอย่างใกล้ชิดและให้ความช่วยเหลือแนะนำที่ดีในการปรับปรุงข้อบกพร่องในการทำโครงการพิเศษ และขอขอบพระคุณกรรมการทุกท่านในการสอบโครงการพิเศษที่ให้ข้อคิดเห็นและคำแนะนำในการทำโครงการพิเศษให้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

ขอขอบพระคุณ ผศ.ดร.อาภาภรณ์ สกฤการะเวก อาจารย์ประจำภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ และ ผศ.ดร.ราชศักดิ์ ศักดานุภาพ อาจารย์ประจำสาขาฟิสิกส์ วิทยาลัยนวัตกรรมการจัดการข้อมูล สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้ความอนุเคราะห์เครื่องมือวัดอัตราการไหลของก๊าซ (Mass Flow Rate) และให้คำแนะนำในการทดสอบเครื่องมือวัดที่ออกแบบ

ขอขอบพระคุณ ศูนย์เทคโนโลยีไมโครอิเล็กทรอนิกส์ (TMEC) ที่ให้ความอนุเคราะห์เครื่องมือในการทดสอบความดันภายในเครื่องมือวัดที่ออกแบบ และให้ความช่วยเหลือ ให้ความรู้ในการทำโครงการพิเศษให้สำเร็จไปด้วยดี

ขอขอบพระคุณ เจ้าหน้าที่อาคารฝึกงานทางวิศวกรรม ภาควิชาฟิสิกส์ ที่อำนวยความสะดวกและให้ความช่วยเหลือ รวมทั้งให้คำแนะนำการใช้เครื่องมือ

ขอขอบพระคุณ บิดา-มารดา ที่ให้ได้รับการศึกษา ตลอดจนคอยเลี้ยงดูและอบรมสั่งสอนและเป็นกำลังใจเป็นแรงผลักดันในการทำโครงการพิเศษให้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี รวมถึงเพื่อนๆและบุคคลอื่นๆ ที่ไม่ได้กล่าวมา ผู้จัดทำโครงการพิเศษขอขอบคุณเป็นอย่างสูงมา ณ โอกาสนี้

กรรณิการ์ แก่นจันทร์

กานต์ธิดา แผ้วพลสง

ณัฐวิโรจน์ สมใจเจริญ

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง	ฉ
สารบัญรูป	ช
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	1
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย	1
1.4 ขั้นตอนการวิจัยและวิธีการดำเนินงาน	2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	4
2.1 หลักการเบื้องต้นของกลศาสตร์ของไหล	4
2.1.1 คุณสมบัติของไหล (Fluid)	4
2.1.2 การไหลภายใน (Inlet Flow)	6
2.1.3 การวัดอัตราการไหล (Flow rate measurement)	7
2.1.4 หลักการของเครื่องมือวัดอัตราการไหล	8
2.1.5 ผลต่างของความดัน (Differential Pressure)	12
2.2 ความดันบรรยากาศ	12
2.3 อาดูโน	14
2.3.1 จุดเด่นที่ทำให้บอร์ดอาดูโนเป็นที่นิยม	14
2.3.2 รูปแบบการเขียนโปรแกรมบนอาดูโน	14
2.3.3 Layout & Pin out Arduino Board (Model: Arduino UNO R3)	16
2.4 สเต็ปเปอร์มอเตอร์ (Stepper Motor)	17
2.4.1 ข้อดีของสเต็ปเปอร์มอเตอร์เมื่อเปรียบเทียบกับ DC มอเตอร์	17
2.4.2 เฟสของสเต็ปเปอร์มอเตอร์ (Stepper Motor Phase)	17
2.4.3 ชนิดของสเต็ปเปอร์มอเตอร์	17
2.4.4 วิธีการขับ (Driving) หรือวิธีการกระตุ้นเฟส (Phase Excitation) ของสเต็ปเปอร์มอเตอร์	24
2.5 วาล์ว (Valve)	25
2.5.1 ชนิดของวาล์ว	25
2.5.2 การออกแบบวาล์ว (Valve design)	26

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.6 เซ็นเซอร์ตรวจจับผลต่างของความดัน (Differential Pressure Sensor)	27
2.7 IC : integrated circuit	27
2.7.1 ไอซีเร็กกูเลเตอร์ (IC Regulator)	28
2.8 รีเลย์ (Relay Module)	28
2.8.1 ภายใน Relay	29
2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	30
2.9.1 “Experimental and numerical Investigation on the performance of small-sized cavitating venturis”	30
2.9.2 “Cfd Simulation on Different Geometries of Venturimeter”	31
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย	32
3.1 วัสดุและอุปกรณ์	37
3.2 วิธีการดำเนินงาน	39
3.2.1 เครื่องมือวัดชุดทดลองท่อเวนทูรี	39
3.2.2 วงจรควบคุมการทำงาน	44
3.2.3 เครื่องมือวัดที่ติดตั้งเรียบร้อย	47
บทที่ 4 ผลการวิจัยและการอภิปรายผล	48
4.1 การทดลองความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลของก๊าซไนโตรเจน กับผลต่างของความดัน	48
4.1.1 ตอนที่ 1 การวิเคราะห์จากสมการทฤษฎีของแบร์นูลลี เพื่อคำนวณหาผลต่างความดัน	48
4.1.2 ตอนที่ 2 การวิเคราะห์ผลจากการทดสอบในโปรแกรมโซลิคเวิร์ค	51
4.1.3 ตอนที่ 3 การวิเคราะห์ผลจากการทดสอบในทางปฏิบัติ โดยใช้เครื่องมือวัดอัตราการไหล (Flow rate model 0550E)	53
4.2 วิเคราะห์ผลจากการทดลองทั้ง 3 ขั้นตอน	56
4.2.1 ตอนที่ 4 การทดลองจากการทดสอบในทางปฏิบัติ โดยใช้เครื่องมือวัดที่ออกแบบ	60
4.3 การอภิปรายผล	61
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	63
5.1 สรุปผลการวิจัย	63
5.2 ข้อเสนอแนะ	63
เอกสารอ้างอิง	64
ภาคผนวก	66
ภาคผนวก ก ตารางแสดงผลการวิจัย	67
ภาคผนวก ข Datasheet	75

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1.1	ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัยระยะเวลา (ก.ค พ.ศ. 2559 ถึง ธ.ค พ.ศ.2559)	2
2.1	ตารางแสดงหน่วยต่างๆ ของความดัน	13
2.2	การกระตุ้นเฟสแบบ One phase excitation หรือ Wave หรือ Half Drive	24
2.3	การกระตุ้นเฟสแบบ Two phase excitation หรือ Full Step	24
2.4	ตารางผลการทดลองของงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	31
3.1	วัสดุและอุปกรณ์ที่เกี่ยวข้อง	32
4.1	การวิเคราะห์จากสมการทฤษฎีของแบร์นูลลี เพื่อคำนวณหาผลต่างของความดัน	49
4.2	การวิเคราะห์ผลจากการทดสอบในโปรแกรมโซลิดเวิด (SolidWorks)	51
4.3	การวิเคราะห์ผลจากการทดสอบในทางปฏิบัติโดยใช้เครื่องมือวัดอัตราการไหล	54
4.4	ผลการทดลองจากการวิเคราะห์ผลจากการทดสอบในทางปฏิบัติ โดยใช้เครื่องมือวัดที่ออกแบบ โดยแสดงผลจากตัวเซ็นเซอร์ตรวจจับผลต่างของความดัน	60



สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 Velocity Profile ของการไหล	5
2.2 แสดงถึงการไหลแบบ (ก) การไหลในท่อ (ข) การไหลแบบช่องเปิด	6
2.3 แสดงถึงสภาวะการไหลแบบราบเรียบและแบบปั่นป่วน	6
2.4 แสดงถึงการไหลในย่านขาเข้าการไหลที่กำลังพัฒนาและการไหลแบบพัฒนาเต็มที่	7
2.5 ตัวอย่างอุปกรณ์วัดการไหลชนิดต่างๆ	9
2.6 โครงสร้างและลักษณะการติดตั้งท่อเวนทูรีภายในท่อ	9
2.7 Orifice meter	10
2.8 Venturi meter	10
2.9 โครงสร้างของท่อเวนทูรี	12
2.10 (ก) บอร์ด Arduino ต่อกับ LED (ข) บอร์ด Arduino ต่อกับ บอร์ด XBee Shield	14
2.11 รูปแบบการเขียนโปรแกรมบนอาดูโน	14
2.12 เลือกรุ่นบอร์ดอาดูโนที่ต้องการ upload	15
2.13 เลือกหมายเลข Comport ของบอร์ด	15
2.14 กดปุ่ม Verify เพื่อตรวจสอบความถูกต้อง และ Compile โค้ดโปรแกรม	15
2.15 Upload โค้ดโปรแกรม	15
2.16 บอร์ด Arduino	16
2.17 ลักษณะการพันขดลวดบนสเตเตอร์	17
2.18 โครงสร้างสเต็ปเปอร์มอเตอร์ชนิดวาริเอเบิลรีลักแตนซ์และสัญลักษณ์	18
2.19 สเต็ปเปอร์มอเตอร์ชนิดเพอร์มาเนนต์แมกเน็ต	19
2.20 สเต็ปเปอร์มอเตอร์ชนิดไฮบริดขนาด 5 เฟส	19
2.21 สัญลักษณ์,โครงสร้างและวงจรขับที่ใช้กับมอเตอร์แบบไบโพลาร์ 2 เฟส	20
2.22 สัญลักษณ์,โครงสร้างและวงจรขับที่ใช้กับมอเตอร์แบบยูนิโพลาร์ 2 เฟส	20
2.23 สัญลักษณ์ ,โครงสร้างมอเตอร์ 2 เฟสที่พันลวดแบบไบโพลาร์และแยกปลายของแต่ละขด	21
2.24 สัญลักษณ์การต่อสายแบบต่างๆ	21
2.25 โครงสร้างและการจัดตำแหน่งพื้นที่โรเตอร์ของสเต็ปเปอร์มอเตอร์ชนิดไฮบริด	22
2.26 โครงสร้างและการจัดตำแหน่งพื้นที่สเตเตอร์ของสเต็ปเปอร์มอเตอร์ชนิดเพอร์มาเนนต์แมกเน็ต	22
2.27 โครงสร้างของสเต็ปเปอร์มอเตอร์ชนิดไฮบริด 2 เฟสที่มีจำนวนสเต็ปต่อรอบ 200 สเต็ป	23
2.28 เซ็นเซอร์ตรวจจับผลต่างของความดัน (Differential Pressure Sensors)	27
2.29 (ก) ลักษณะ IC ทั่วๆ ไป (ข) ลักษณะภายในของ IC	27
2.30 โครงสร้างของไอซีรีเลย์มอเตอร์	28
2.31 สัญลักษณ์ในวงจรไฟฟ้าของรีเลย์	28
2.32 (ก) SPST และ (ข) DPST	29
2.33 สภาวะการทำงานของ Relay	29

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.34 ลักษณะของ Relay Module	30
3.1 Stepper Motor (42HB34F08AB)	32
3.2 Driver Motor (A4988)	32
3.3 Regulator (LM1117)	32
3.4 Buzzer 5V	33
3.5 Relay Module 12V	33
3.6 ชุด Arduino UNO R3	33
3.7 วาล์วควบคุม (Control Valves)	33
3.8 Differential Pressure Sensors	34
3.9 ตัวแปลงไฟ 12V	34
3.10 คีย์แพด	34
3.11 จอแสดงผล (LCD)	34
3.12 โรตารีเมตร	35
3.13 ก๊าซไนโตรเจน	35
3.14 Aluminum Alloy Coupling for Motor	35
3.15 ราง CNC ที่ประกอบขึ้นเอง	36
3.16 ท่อเวนทูลรี ที่ออกแบบเอง	36
3.17 พัดลมระบายอากาศ 12V	36
3.18 แผ่นอะคริลิกแบบสีใสและสีดำ	36
3.19 น้ำยาเชื่อมประสานอะคริลิก	37
3.20 กาวซิลิโคน	37
3.21 แผ่นปรี้นทองแดง	37
3.22 สายไฟสำหรับบอร์ดอาดูโน	38
3.23 สายไฟเล็ก	38
3.24 อุปกรณ์ใช้สำหรับการประกอบแผงวงจรควบคุม	38
3.25 Layout การออกแบบท่อเวนทูลรี	39
3.26 การออกแบบท่อเวนทูลรี ส่วนที่ 1	40
3.27 การออกแบบท่อเวนทูลรี ส่วนที่ 2	40
3.28 การออกแบบท่อเวนทูลรี ส่วนที่ 3	41
3.29 การออกแบบท่อเวนทูลรี นำทั้ง 3 ส่วนมาประกอบกัน	41
3.30 ตัวอย่างการวิเคราะห์ระหว่าง อัตราการไหลของก๊าซ, Q (mL/min) กับ ผลต่างของความดัน, ΔP (Pa) โดยใช้ฟังก์ชันการวิเคราะห์อัตราการไหลในท่อ (Flow Simulation) บนโปรแกรมโซลิดเวิร์ค (SolidWorks)	42

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.31 ตัวอย่างการวิเคราะห์ระหว่างค่าผลต่างของความดัน, กับ อัตราการไหลของก๊าซ, โดยใช้ฟังก์ชันการวิเคราะห์อัตราการไหลในท่อ (Flow Simulation) บนโปรแกรมโซลิดเวิร์ค (SolidWorks)	43
3.32 ลักษณะท่อเวนทูลีเครื่องมือวัดจริง	43
3.33 ไดอะแกรม สำหรับการเชื่อมต่อไมโครคอนโทรลเลอร์ไปยัง A4988 Stepper Driver Module เพื่อขับสเต็ปเปอร์มอเตอร์ (Full-step mode)	44
3.34 (ก) วาล์วควบคุม (Control Valves) (ข) วาล์วเชื่อมต่อกับ Stepper Motor	45
3.35 Schematic การต่อวงจร IC LM1117 Voltage Regulator 3.3V	45
3.36 PCB Layout ของวงจร	46
3.37 บอร์ดวงจรควบคุมระบบการทำงานของระบบเครื่องวัดที่ออกแบบ	46
3.38 ลักษณะภายในวัสดุและอุปกรณ์ของเครื่องมือวัดในระบบ	47
3.39 เครื่องมือวัดที่ออกแบบแล้วประกอบเสร็จเรียบร้อยแล้ว	47
4.1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลของก๊าซไนโตรเจน, Q (mL/min) กับ ผลต่างของความดัน, ΔP (Pa) ซึ่งได้จากการวิเคราะห์จากการทฤษฎีของแบร์นูลลี เพื่อคำนวณผลต่างของความดัน	50
4.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลของก๊าซไนโตรเจน, Q (mL/min) กับ ผลต่างของความดัน, ΔP (Pa) ซึ่งได้จากการวิเคราะห์ผลการทดลองจากการทดสอบในโปรแกรม โซลิดเวิร์ค (SolidWorks) โดยใช้ฟังก์ชันการวิเคราะห์ของไหล ในท่อที่ออกแบบ (Flow Simulation)	52
4.3 ภาพจริงการทดลองจากการทดสอบท่อเวนทูลีโดยการทดสอบในทางปฏิบัติ โดยใช้เครื่องมือวัดอัตราการไหลของก๊าซ (Flow rate model 0550E)	53
4.4 ภาพไดอะแกรมการวิเคราะห์ผลการทดสอบในทางปฏิบัติ โดยใช้เครื่องมือวัดอัตราการไหล (Flow rate model 0550E)	53
4.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลของก๊าซไนโตรเจน, Q (mL/min) กับ ผลต่างของความดัน, ΔP (Pa) ซึ่งได้จากการวิเคราะห์ผลการทดลองจากการทดสอบในทางปฏิบัติโดยใช้เครื่องมือวัดอัตราการไหล (Flow rate model 0550E)	55
4.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลของก๊าซไนโตรเจน, Q (mL/min) กับ ผลต่างของความดัน, ΔP (Pa) ซึ่งได้จากการวิเคราะห์ผลการทดลองจากการทดสอบทั้ง 3 ผลการทดลอง	56
4.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลของก๊าซไนโตรเจน, Q (mL/min) กับ ผลต่างของความดัน, ΔP (Pa) ซึ่งได้จากการวิเคราะห์ผลการทดลองจากการทดสอบในทางปฏิบัติโดยใช้เครื่องมือวัดอัตราการไหล (Flow rate model 0550E)	57
4.8 แผนผังการทำงานของชุดคำสั่งควบคุมอัตราการไหลของก๊าซไนโตรเจน	58

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย

ในปัจจุบันมีเทคนิคหลายอย่าง ที่นำมาประยุกต์ในการวัดอัตราการไหลของก๊าซ เช่น เครื่องมือวัดที่อาศัยการควบคุมความดัน เพื่อให้เครื่องมือวัดเป็นเครื่องมือวัดที่มีประสิทธิภาพ และเกิดประโยชน์สูงสุด จากการศึกษาข้อมูลในทางด้านนี้ เราจึงได้นำหลักการทฤษฎีของแบร์นูลลี หลักการวัดผลต่างของความดัน และ การทำงานของโปรแกรมอาดูโน (Arduino) มาประยุกต์ใช้ในงานวิจัยของเรา เพื่อให้มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น

ซึ่งในงานวิจัยของเรา จะประยุกต์ใช้ มาตราวัดอัตราการไหลแบบเวนทูรี (Venturi) คือ เครื่องมือวัดอัตราการไหลของก๊าซหรือของเหลวโดยอาศัยการตรวจวัดผลต่างของความดันที่เปลี่ยนแปลงเมื่อก๊าซหรือของเหลวไหลผ่านสิ่งกีดขวาง (การลดพื้นที่หน้าตัดหรือช่องการไหล) จะก่อให้เกิดความดันที่เปลี่ยนแปลงขึ้นเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงทิศทางและความเร็วของการไหล ดังนั้นหากตรวจวัดผลต่างของความดันที่เกิดขึ้นได้ ก็จะสามารถนำไปคำนวณหาอัตราการไหลของก๊าซหรือของเหลวได้

งานวิจัยของเรา ทำงานร่วมกับโปรแกรมอาดูโน (Arduino) ซึ่งเป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ มีลักษณะเป็นบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ ตระกูล AVR ซึ่งบอร์ด Arduino ถูกออกแบบมาให้ใช้งานได้ง่าย สามารถต่อวงจรอิเล็กทรอนิกส์และเชื่อมต่อเข้ามาที่ช่องขาเข้าหรือขาออก (Input/Output) ของบอร์ดซึ่งในการใช้งานที่ง่ายของโปรแกรมอาดูโน (Arduino) ได้ถูกนำมาควบคุมอัตราการไหลของก๊าซหรือของเหลว ซึ่งในการควบคุมนี้จะใช้ร่วมกับวาล์วและสเต็ปเปอร์มอเตอร์ ซึ่งวาล์วและ สเต็ปเปอร์มอเตอร์จะถูกควบคุมด้วยชุดคำสั่งของโปรแกรมอาดูโน (Arduino) โดยเราได้ทำการทดสอบว่า หลักการที่เรานำมาใช้กับเครื่องมือวัดที่ออกแบบมีประสิทธิภาพมากเพียงใด เพื่อประโยชน์ต่อการนำไปศึกษาต่อยอดงานวิจัยในอนาคต

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

- 1) เพื่อศึกษาอัตราการไหลที่เกิดจากผลต่างของความดัน
- 2) เพื่อสร้างเครื่องมือในการวัดและควบคุมอัตราการไหลของก๊าซ
- 3) เพื่อนำเครื่องมือวัดที่ออกแบบไปประยุกต์ใช้งานในห้องปฏิบัติการ

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

- 1) วัดอัตราการไหลของก๊าซไนโตรเจนที่เข้าสู่เตาเผาในห้องปฏิบัติการ ช่วงอัตราการไหลระหว่าง 0-800 mL/min
- 2) สร้างและทดสอบการควบคุมอัตราการไหลของก๊าซหรือของเหลว โดยอาศัยเครื่องมือ ได้แก่ แมคคาทรอนิกส์และมาตราวัดอัตราการไหลแบบเวนทูรี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.4 ขั้นตอนการวิจัยและวิธีการดำเนินงาน

ขั้นตอนการวิจัยและสามารถแบ่งได้ดังนี้

- ขั้นตอนที่ 1 ศึกษาความเป็นไปได้ของงานวิจัยและวางแผนการทำงาน
- ขั้นตอนที่ 2 ศึกษาค้นคว้าทฤษฎีแบร์นูลลีและหลักการทำงานการควบคุมอัตราการไหลของ ก๊าซหรือของเหลว โดยอาศัยเครื่องมือวัดได้แก่ แมคคาโนควาล์วและมาตรวัด อัตราการไหลแบบเวนทูรี
- ขั้นตอนที่ 3 ออกแบบมาตรวัดอัตราการไหลแบบเวนทูรี
- ขั้นตอนที่ 4 ศึกษาและวางแผนในการนำอุปกรณ์ที่เป็นส่วนประกอบสำคัญในการควบคุม อัตราการไหลของก๊าซ
- ขั้นตอนที่ 5 ประกอบอุปกรณ์ควบคุมอัตราการไหลของก๊าซเชื่อมกับมาตรวัดอัตราการไหล แบบเวนทูรี
- ขั้นตอนที่ 6 ทดสอบการทำงานของเครื่องมือวัดที่ออกแบบ โดยการตรวจวัดผลต่างของ ความดันที่เปลี่ยนแปลงและการควบคุมอัตราการไหลของก๊าซ
- ขั้นตอนที่ 7 วิเคราะห์และสรุปผลการทดลอง
- ขั้นตอนที่ 8 อภิปรายและจัดทำรูปเล่มเพื่อเผยแพร่

ตารางที่ 1.1 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัยระยะเวลา (ก.ค พ.ศ. 2559 ถึง ธ.ค พ.ศ.2559)

การดำเนินงาน	ระยะเวลา (ก.ค พ.ศ. 2559 ถึง ธ.ค พ.ศ.2559)					
	ก.ค	ส.ค	ก.ย	ต.ค	พ.ย	ธ.ค
ขั้นตอนที่ 1						
ขั้นตอนที่ 2						
ขั้นตอนที่ 3						
ขั้นตอนที่ 4						

ตารางที่ 1.1 (ต่อ) ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัยระยะเวลา (ม.ค พ.ศ. 2560 ถึง มิ.ย พ.ศ.2560)

การดำเนินงาน	ระยะเวลา (ม.ค พ.ศ. 2560 ถึง มิ.ย พ.ศ.2560)					
	ม.ค	ก.พ	มี.ค	เม.ย	พ.ค	มิ.ย
ขั้นตอนที่ 5						
ขั้นตอนที่ 6						
ขั้นตอนที่ 7						
ขั้นตอนที่ 8						

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1) เครื่องมือวัดที่ออกแบบสามารถนำมาประยุกต์ใช้ในห้องปฏิบัติการได้จริง
- 2) สามารถแก้ไขปัญหาและข้อผิดพลาดที่เกิดขึ้นระหว่างการทดสอบได้
- 3) สามารถนำเครื่องมือวัดที่ออกแบบมาประยุกต์ใช้งานร่วมกับไมโครคอนโทรลเลอร์ได้
- 4) สามารถเข้าใจระบบการทำงานต่างๆของเครื่องมือวัดที่ออกแบบ โดยอาศัยหลักการควบคุม อัตราการไหลของก๊าซหรือของเหลว และหลักการทฤษฎีของแบร์นูลลี



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

เครื่องมือวัดที่ออกแบบได้แก่ มาตรวัดอัตราการไหลของก๊าซแบบเวนทูรี ซึ่งสามารถควบคุมอัตราการไหลของก๊าซหรือของเหลวได้โดยอาศัยหลักการทฤษฎีของแบร์นูลลีหรือหลักการวัดความดันแตกต่างกันได้ และ การทำงานร่วมกับโปรแกรม Arduino ซึ่งควบคุมการทำงานของสเตปเปอร์มอเตอร์ ทำให้เป็นประโยชน์ต่อการนำมาประยุกต์ใช้ในงานวิจัยอย่างยิ่ง

2.1 หลักการเบื้องต้นของกลศาสตร์ของไหล

กลศาสตร์ของไหล มีความสำคัญอย่างยิ่งต่อชีวิตประจำวัน รวมถึงในทางอุตสาหกรรมด้วย เครื่องอำนวยความสะดวก เครื่องจักรต่างๆ และกระบวนการผลิตในอุตสาหกรรมนั้น ก็จะประกอบไปด้วยของไหลแทบทั้งสิ้น เช่น เครื่องปรับอากาศ ระบบน้ำ เป็นต้น ดังนั้นพื้นฐานความรู้ในวิชานี้จึงมีความจำเป็นสำหรับการคำนวณการออกแบบ ระบบเพื่อให้มีการนำไปใช้งานได้อย่างมีประสิทธิภาพมากที่สุดโดยเฉพาะในภาคอุตสาหกรรม [4]

2.1.1 คุณสมบัติของไหล (Fluid)

ของไหล (Fluid) คือของเหลว และก๊าซ ในการวิเคราะห์จะต่างกันตรงที่ก๊าซจะเป็นของไหลที่สามารถอัดตัวได้ ส่วนของเหลวนั้นไม่สามารถอัดตัวได้ ถึงแม้จะอัดตัวได้บ้าง แต่ต้องใช้ความดันสูงมาก จึงพิจารณาว่าของเหลวเป็นของไหลที่อัดตัวไม่ได้

ของไหลอัดตัวได้ คือของไหลที่ความหนาแน่นไม่คงที่ขึ้นอยู่กับตัวแปรหลายตัว เช่น ก๊าซอยู่ในสถานะปิดสนิทเมื่อได้รับความร้อน ความหนาแน่นของก๊าซก็จะเพิ่มขึ้น ตรงกันข้ามถ้าสูญเสียความร้อน ความหนาแน่นก็จะลดลง ในที่นี้จะกล่าวเฉพาะของไหลที่อัดตัวไม่ได้เท่านั้น

คุณสมบัติทางฟิสิกส์บางประการของของไหล ได้แก่ ความดัน ความหนาแน่น ความเร็ว ค่าเหล่านี้จะมีความสัมพันธ์ต่อการไหลซึ่งจะกล่าวต่อไป [4]

2.1.1.1 ความดัน (Pressure, P) คือ เนื่องจากความดันมีความสัมพันธ์กับแรงต่อพื้นที่หน้าตัดดังนั้น เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงพื้นที่หน้าตัดจะทำให้ค่าความดันเปลี่ยนแปลงไปด้วย เราสามารถนำหลักการนี้ไปใช้เพื่อคำนวณหาความเร็วการไหลของของไหลได้ จากสมการของแบร์นูลลีซึ่งเป็นการสำหรับการไหลของ Steady, Incompressible, in viscid และใช้ได้ตามเฉพาะการไหล

2.1.1.2 ความหนาแน่น (Density, ρ) คือ ใช้ในการคำนวณหาค่าความดันของของไหล ณ จุดใดๆ โดยความหนาแน่นบ่งบอกถึง มวลต่อปริมาตร

2.1.1.3 ความหนืด (Viscosity, μ) คือ คุณสมบัติการต้านการเคลื่อนที่ของของไหล

2.1.1.4 ความเร็ว (Velocity, v) คือ จะเป็นค่าตัวแปรที่กำหนดพฤติกรรมของการไหลของไหลว่าจะเป็นไปในลักษณะใด กล่าวคือ เมื่อความเร็วเฉลี่ยของของไหลเป็นไปอย่างช้าๆ เราจะเรียกการไหลแบบนี้ว่า การไหลแบบราบเรียบ (Laminar flow) ซึ่งการไหลแบบนี้จะพบเห็นกันเป็นจำนวนมาก อนึ่งการไหลแบบปั่นป่วนนี้จะเป็นการไหลที่มีรูปแบบไม่แน่นอน

2.1.1.5 จำนวนเลขเรย์โนลด์ (Reynolds Number) คือ เป็นเลขดัชนีที่บ่งบอกสภาพปรากฏการณ์การไหลของของไหล ซึ่งเป็นสัดส่วนของ inertia/viscous จำนวนเลขเรย์โนลด์จะมีค่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขึ้นอยู่กับความเร็วการไหล ความหนืด ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางท่อ และความหนาแน่นของของไหล เราอาจเขียนความสัมพันธ์ดังกล่าวได้เป็น

$$Re = \frac{\rho \bar{v} D}{\mu}$$

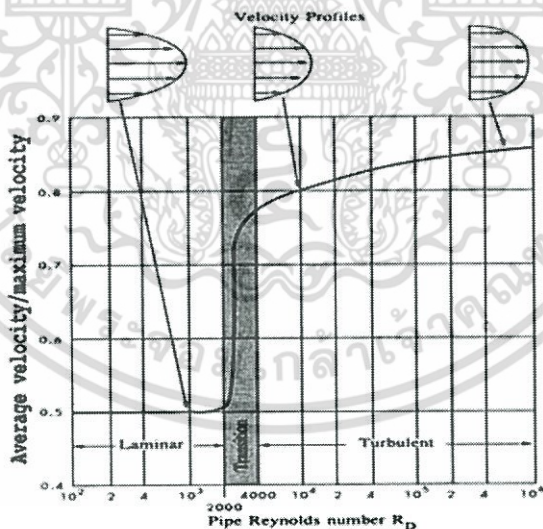
- เมื่อ Re คือ จำนวนเลขเรย์โนลด์ (Reynolds Number)
 \bar{v} คือ ความเร็วเฉลี่ยของการไหล (m/s)
 D คือ เส้นผ่านศูนย์กลางภายในท่อ (m)
 ρ คือ ความหนาแน่นของของไหล (kg/m)
 μ คือ ความหนืดของของไหล (kg/ms)

จำนวนเลขเรย์โนลด์ไม่มีหน่วย และมีความสำคัญอย่างมาก กล่าวคือ จำนวนเลขนี้ใช้เป็นตัวกำหนดรูปแบบการไหลของของไหลว่าเป็นแบบใด เช่น

Re อยู่ในช่วง 0-2000 สภาพการไหลเป็นแบบ Laminar Flow

Re อยู่ในช่วง 2001-4000 สภาพการไหลเป็นแบบ Transition Zone คือ มีการไหล 2 แบบ คือ Laminar + Turbulent

Re มากกว่า 4000 สภาพการไหลเป็นแบบ Turbulent Flow



รูปที่ 2.1 Velocity Profile ของการไหล [4]

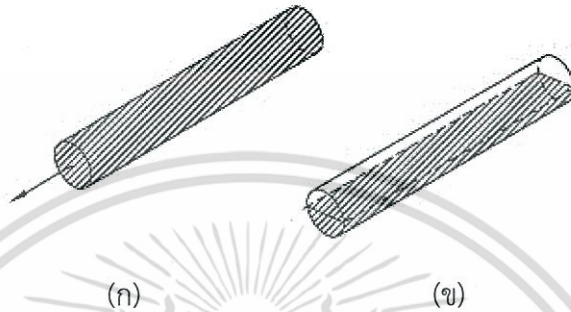
ในกรณีที่ของไหล ไหลเข้าท่อโดยให้การไหลเป็นแบบ Uniform flow ดังรูปที่ 2.1 เมื่อพิจารณาถึงผลกระทบของความหนืดพบว่า ในกรณีของไหลหนืดนั้น จะมีผลกระทบจากแรงเฉือน ซึ่งทำให้เกิดชั้น Boundary layers ขึ้น การไหลในช่วงนี้จะมีแบ่งออกเป็น 2 ส่วนชัดเจน เราเรียกระยะทางที่ของไหลไหลเข้าว่า เป็นช่วง Entrance length, L_e หลังจากช่วงนี้ การไหลจะเปลี่ยนเป็นแบบ Fully developed ซึ่งการไหลในช่วงนี้ ความเร็วจะไม่เป็นเปลี่ยนแปลงกับระยะทางตามแนวการไหล (x)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.2 การไหลภายใน (Inlet Flow)

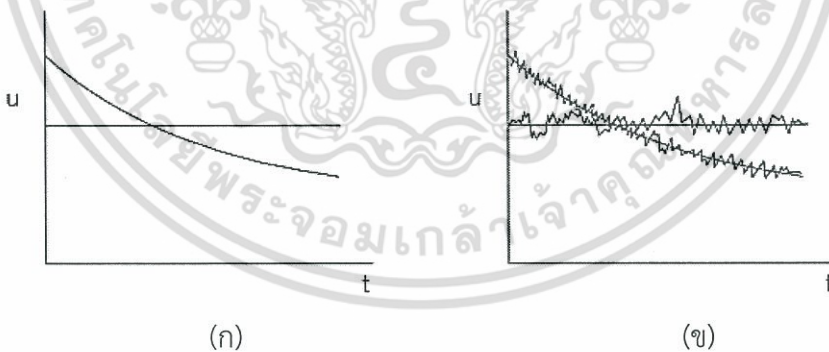
2.1.2.1 การไหลช่วงขาเข้ากับการไหลแบบพัฒนาเต็มที่

การไหลแบบภายในที่จะกล่าวถึงในบทนี้จะเป็นการไหลที่จะต้องมีการไหลเต็มดังที่แสดงไว้ในรูปที่ 2.2 (ก) ไม่ใช่การไหลที่มีช่องอากาศอยู่แบบการไหลของท่อน้ำฝนหรือการไหลของน้ำในท่อระบายน้ำที่มีลักษณะอย่างทีแสดงไว้ในรูปที่ 2.2 (ข) ซึ่งมักจะเรียกการไหลในลักษณะที่สองนี้ว่าเป็นการไหลแบบช่องเปิด (Open Channel Flow) [1]



รูปที่ 2.2 แสดงถึงการไหลแบบ (ก) การไหลในท่อ (ข) การไหลแบบช่องเปิด [1]

การไหลแบบภายในมีสภาพการไหลแบ่งเป็น สองสถานะคือการไหลแบบราบเรียบ และการไหลแบบปั่นป่วน การไหลในช่วงต่อระหว่างการไหลสถานะแบบราบเรียบกับสถานะการไหลแบบปั่นป่วนจะเรียกว่าการไหลแบบช่วงต่อ (Transition) ลักษณะการไหลทั้งสองสถานะถูกแสดงไว้ใน รูปที่ 2.3 (เมื่อ u คือ ความเร็วสูงสุดของการไหลนอกชั้นขอบเขต และ t คือ เวลา) และตัวแปรไร้มิติที่เป็นตัวกำหนดสถานะการไหลก็คือตัวเลขเรย์โนลด์ [1]



รูปที่ 2.3 แสดงถึงสถานะการไหลแบบราบเรียบและแบบปั่นป่วน [1]

(ก) การไหลแบบราบเรียบคงตัวและไม่คงตัว

(ข) การไหลแบบปั่นป่วนคงตัวและไม่คงตัว

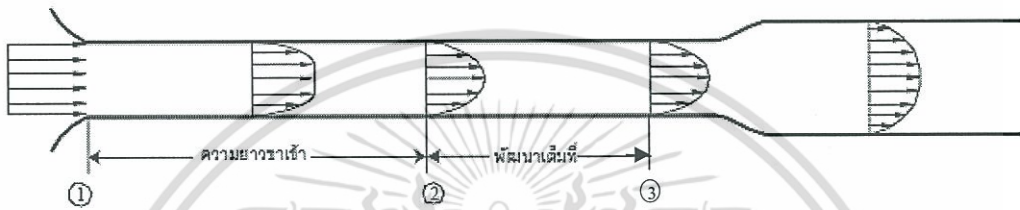
ในช่วงเริ่มต้นก่อนที่ของไหลจะไหลเข้าสู่ท่อนั้นของไหลมีรูปร่างความเร็วอยู่ในลักษณะสม่ำเสมอและจากเงื่อนไขไม่ลื่นไถล (no slip condition) จะทำให้ของไหลที่ไหลเข้าสู่ท่อต้องลดความเร็วลงมาเท่ากับศูนย์ที่ผนังของท่อก่อให้เกิดเป็นรูปร่างของความเร็วขึ้นและรูปร่างความเร็วจะพัฒนาขึ้นตามความหนาของชั้นขอบเขต (Boundary Layer) ที่เกิดขึ้นบนผนังท่อจนกระทั่งเมื่อชั้นขอบเขตนี้ได้ขึ้นจนเบียดชนกันที่ตำแหน่งที่ 2 ในรูปที่ 2.4 ช่วงของการไหลจากตำแหน่งที่ 1 ถึง 2 จะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เรียกว่าช่วงการไหลในย่านขาเข้า (Entrance Region) และเรียกความยาวของท่อในการไหลช่วงนี้ว่า ความยาวขาเข้า (Entrance Length) [1]

2.1.2.2 การไหลที่พัฒนาเต็มที่ (fully developed flow)

เป็นการไหลในช่วงจากตำแหน่งที่ 2 ถึง 3 ซึ่งรูปร่างความเร็วจะมีค่าคงที่เมื่อมีการเปลี่ยนทิศทางของท่อหรือเปลี่ยนขนาดของท่อหรือเมื่อของไหลไหลผ่านอุปกรณ์วาล์วรูปร่างของความเร็วของการไหลจะเปลี่ยนจากรูปร่างความเร็วของการไหลที่พัฒนาเต็มที่ไปและต้องใช้ระยะของท่อช่วงหนึ่งที่จะทำให้รูปร่างของความเร็วที่เปลี่ยนแปลงไปกลับสู่สภาวะการไหลแบบพัฒนาเต็มที่อีกครั้งตามที่แสดงไว้ในรูปที่ 2.4 [1]



รูปที่ 2.4 แสดงถึงการไหลในย่านขาเข้า การไหลที่กำลังพัฒนา และการไหลแบบพัฒนาเต็มที่ [1]

ค่าความยาวของย่านขาเข้าอาจกำหนดโดยความสัมพันธ์ต่อไปนี้ [1]

$$\frac{L_e}{D} = 0.06 \frac{\rho v D}{\mu} \quad \text{สำหรับการไหลแบบราบเรียบ (2.1)}$$

$$\frac{L_e}{D} = 4.4 \left(\frac{\rho v D}{\mu} \right)^{1/6} \quad \text{สำหรับการไหลแบบปั่นป่วน (2.2)}$$

โดยที่ค่า L_e คือค่าความยาวขาเข้า v เป็นค่าความเร็วเฉลี่ยของการไหลในท่อ

2.1.3 การวัดอัตราการไหล (Flow rate measurement)

สามารถแบ่งรูปแบบของการวัดการไหลตามสถานะของตัวกลางที่ต้องการวัดได้ 2 รูปแบบ คือ ของแข็ง และของไหล (ของเหลวและก๊าซ) [6]

2.1.3.1 การวัดการไหลของของแข็ง มีเงื่อนไขของแข็งที่ต้องการวัดการไหลต้องมีขนาดและมวลที่ใกล้เคียงหรือเท่ากัน เช่น เมล็ดธัญพืช หรือ อาหารผง เป็นต้น ใช้วิธีการวัดมวลหรือน้ำหนักของของแข็งต่อหน่วยเวลา หรือการวัดอัตราการไหลเชิงมวลหรือน้ำหนัก (mass or weight flow rate: $F = \rho Q$, kg/s) โดยคิดจากความหนาแน่นเชิงมวลของของแข็ง (bulk density : kg/m³) และอัตราการไหลเชิงปริมาตรของของแข็ง (Volume flow rate : Q , m³/sec)

2.1.3.2 การวัดการไหลของของไหล แบ่งประเภทตามลักษณะการทำงานของเครื่องมือวัดออกเป็น 2 ประเภท คือ การวัดการไหลเชิงปริมาตร (volume flow: V , m³) ในหนึ่งช่วงเวลา (time: t , sec) หรือการวัดอัตราการไหลเชิงปริมาตร (Volume flow rate: $Q = V/t$, m³/sec) และการวัดอัตราการไหล (rate of flow measurement : $Q = vA$, m³/sec) ด้วยการวัดเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความเร็วของของไหล (flow velocity: v , m/s) ที่ไหลผ่านพื้นที่หน้าตัด (cross section area: A , m^2) ตัวอย่างเช่น มิเตอร์วัดการไหลชนิดใบพัดหรือเทอร์ไบน์ (Turbine flow meter) จัดเป็นเครื่องมือวัดการไหลเชิงปริมาณซึ่งทำงานโดยอาศัยการวัดปริมาณของไหลที่ไหลผ่านเครื่องมือวัดอย่างต่อเนื่องในหนึ่งช่วงเวลา

นอกจากนี้ การวัดการไหลยังแบ่งตามลักษณะการไหลได้ออกเป็น 2 ประเภทคือ [6]

1. การวัดการไหลของของไหลภายในท่อระบบปิด ตัวอย่างอุปกรณ์วัดการไหล เช่น แผ่นออ-ริฟิส (Orifice plate) ท่อเวนจูรี (Venturi tube) นอซเซิล (Nozzle) โรตاميเตอร์ (Rotameter) แอนนีโมมิเตอร์แบบขดลวดความร้อน (hot-wire anemometer) เครื่องมือวัดการไหลชนิดสนามแม่เหล็ก (Electromagnetic flow meter) เครื่องมือวัดการไหลชนิดเทอร์ไบน์ (Turbine flow meter) เครื่องมือวัดการไหลชนิดอัลตราโซนิก (Ultrasonic flow meter) เครื่องมือวัดการไหลเชิงมวลชนิดโคริโอลิส (Coriolis flow meter)
2. การวัดการไหลของของเหลวแบบลำรางเปิด เช่น การไหลผ่านทำนบ (Wier) และการไหลผ่านคอคอด (Flumes)

2.1.4 หลักการของเครื่องมือวัดอัตราการไหล

การเลือกใช้เครื่องมือวัดการไหลให้เหมาะสมกับการใช้งาน นอกจากต้องคำนึงถึงราคาของเครื่องมือวัด (Instrument) แล้ว ควรคำนึงถึงองค์ประกอบหลักอื่นด้วย เพื่อให้เครื่องมือวัดเหล่านั้นสามารถทำงานได้อย่างเต็มประสิทธิภาพ มีความถูกต้องแม่นยำ (Accuracy) และมีความน่าเชื่อถือมากที่สุด องค์ประกอบที่ควรพิจารณา ได้แก่ [6]

1. รูปแบบของการวัดการไหล
2. ชนิดและสมบัติของของไหลที่ต้องการวัด ควรพิจารณาสมบัติทางกายภาพที่สำคัญของตัวกลาง เช่น ความหนาแน่น (Density) ความหนืด (Viscosity) ความสามารถในการอัดตัว (Compressibility) การทำปฏิกิริยาเคมี และความบริสุทธิ์ เป็นต้น ของไหลแต่ละชนิดมีค่าสมบัติที่แตกต่างกันและอาจเปลี่ยนแปลงเมื่ออุณหภูมิ (Temperature) หรือความดัน (Pressure) เปลี่ยนแปลงขึ้นอยู่กับสถานะของของไหล ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญในการเลือกใช้เครื่องมือวัด
3. ลักษณะการไหลของของไหลแบ่งได้ 2 ลักษณะ คือ การไหลแบบราบเรียบ (Laminar flow) และการไหลแบบปั่นป่วน (Turbulent flow) พิจารณาได้จากค่าตัวเลขเรย์โนลด์ (Reynolds number, Re) ซึ่งเป็นตัวเลขที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างสมบัติของของไหลที่เปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิ (Temperature) และความดัน (Pressure) ได้แก่ ความหนาแน่น (ρ) และความหนืด (μ) ความเร็วของของไหล (v) ที่ไหลภายในท่อ และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อ (D)
4. ปริมาณการไหลของของเหลวภายในท่อระบบปิด ต้องพิจารณาถึงปริมาณการไหลภายในท่อด้วย เนื่องจากเครื่องมือวัดการไหลบางชนิดไม่สามารถวัดของเหลวที่มีปริมาณการไหลไม่เต็มท่อได้ เช่น เครื่องมือวัดการไหลชนิดสนามแม่เหล็ก (Electromagnetic flow meter) เป็นต้น



(ก)

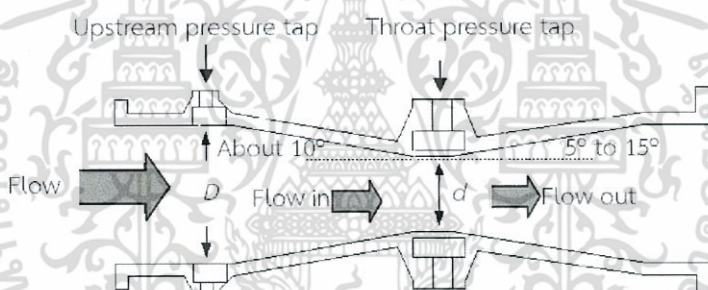
(ข)

(ค)

รูปที่ 2.5 ตัวอย่างอุปกรณ์วัดการไหลชนิดต่างๆ [6]

รูป ก) ท่อเวนทูลรี ข) นอซเซิล ค) แผ่นออริฟิส

มิเตอร์วัดอัตราการไหลมีหลายประเภทที่นิยมใช้คือ Orifice และ Venture มิเตอร์ทั้ง 2 แบบ ทำงานโดยใช้หลักการลดพื้นที่หน้าตัดของการไหลทำให้ความเร็วของการไหลสูงขึ้นพร้อมกับความดันที่ลดลง ความสัมพันธ์ระหว่างความดันที่ลดลงและความเร็วที่เพิ่มขึ้น ทำให้เกิดเป็นแนวคิดหลักของการวัดอัตราการไหล [4]

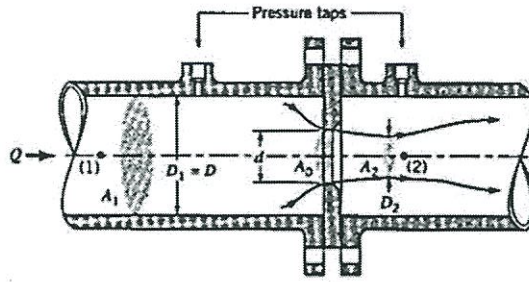


รูปที่ 2.6 โครงสร้างและลักษณะการติดตั้งท่อเวนทูลรีภายในท่อ [6]

การวัดการไหลด้วยท่อเวนทูลรีให้ค่าความเป็นเชิงเส้น (Linearity) ค่าความเที่ยงตรง (Precision) และความแม่นยำ (Accuracy) สูงกว่าการวัดการไหลด้วยแผ่นออริฟิส โดยท่อเวนทูลรีสามารถใช้วัดการไหลของของไหลได้ในทุกกรณีที่มีแผ่นออริฟิสวัดได้ รวมถึงสามารถใช้งานกับของไหลที่มีสารแขวนลอยปะปนได้โดยไม่เกิดการอุดตัน นอกจากนี้ยังใช้วัดการไหลที่มีค่าอัตราการไหลสูงได้ อย่างไรก็ตาม ท่อเวนทูลรีมีราคาค่อนข้างแพง การติดตั้งและการซ่อมบำรุงทำได้ยากเมื่อเปรียบเทียบกับแผ่นออริฟิส โดยเฉพาะอย่างยิ่งการติดตั้งภายในท่อที่มีขนาดเล็ก ดังนั้น โดยทั่วไปจึงนิยมใช้ท่อเวนทูลรีสำหรับการวัดอัตราการไหลในท่อที่มีขนาดใหญ่เท่านั้น [4]

2.1.4.1 Orifice meter

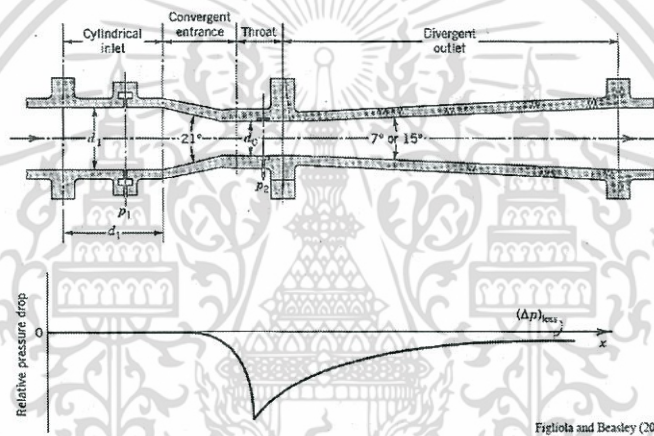
ปกติจะติดตั้งไว้ระหว่างท่อที่มีของไหลไหลผ่าน และตัว Orifice meter จะใช้หน้าแปลนที่มีรูติดตั้งไว้โดยการแทรกไว้ระหว่างตัวเรือน Orifice เพื่อให้ความดันลดลงและเจาะช่องเพื่อต่อ port วัดความดันที่ทางเข้าและออกของแผ่น Orifice [6]



รูปที่ 2.7 Orifice meter [6]

2.1.4.2 Venturi meter

จะใช้หลักการเดียวกันแต่ Venturi meter ถูกออกแบบมาเพื่อลดความดันให้สูญเสียไปน้อยที่สุด โดยการค่อยๆ ลดขนาดหน้าตัดท่อ และค่อยขยายหน้าตัดท่อออก [4] ดังรูป



รูปที่ 2.8 Venturi meter [6]

สมการสำหรับคำนวณหาอัตราการไหลของ Flow rate measurement โดยประยุกต์มาจากสมการของ Bernoulli

$$\frac{P_1}{\rho g} + \frac{v_1^2}{2g} + Z_1 = \frac{P_2}{\rho g} + \frac{v_2^2}{2g} + Z_2 \tag{2.3}$$

โดย Assume

1. ไหลในแนวนอน $Z_1 = Z_2$
 2. ของไหลกอดอัดไม่ได้ระหว่างจุด 1 ถึง 2
 3. การไหลต่อเนื่อง $Q = A_1 v_1 = A_2 v_2$
- (2.4)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สมการอัตราการไหลผ่าน Orifice, Nozzle และ Venturi [4]

จาก $Z_1 = Z_2$

$$P_1 + \frac{\rho v_1^2}{2} = P_2 + \frac{\rho v_2^2}{2}$$

จาก (2.4)

$$v_2 = \frac{A_1}{A_2} v_1$$

แทนใน (2.3)

$$P_2 - P_1 = \frac{\rho v_1^2}{2} \left(\left(\frac{A_1}{A_2} \right)^2 - 1 \right)$$

$$v_1 = \frac{\sqrt{2(P_2 - P_1)}}{\sqrt{\rho \left(\left(\frac{A_1}{A_2} \right)^2 - 1 \right)}}$$

จาก (2.4)

$$Q = A_1 v_1 = A_1 \frac{\sqrt{2(P_2 - P_1)}}{\sqrt{\rho \left(\left(\frac{A_1}{A_2} \right)^2 - 1 \right)}}$$

$$Q_{0,v} = A_1 \frac{\sqrt{2(P_2 - P_1)}}{\sqrt{\rho \left(\left(\frac{A_1}{A_2} \right)^2 - 1 \right)}}$$

(2.5)

- เมื่อ $P_2 - P_1$ คือ ผลต่างความดัน Pa
 A_1, A_2 คือ พื้นที่หน้าตัดต่อ m^2
 ρ คือ ความหนาแน่นของก๊าซ kg/m^3
 Q_0, Q_v คือ อัตราการไหลที่ได้จาก Orifice, Venturi ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การวิเคราะห์สมรรถนะเครื่องมือวัดอัตราการไหล Venturi และ Orifice meter จาก

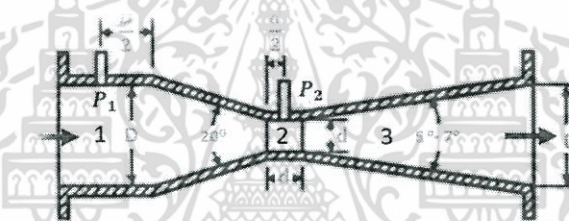
$$Q_{\text{actual}} = CQ_{0,v} \quad (2.6)$$

จะได้ Factor

$$CQ_{0,v} = \frac{Q_{\text{actual}}}{Q_{0,v}} \quad (2.7)$$

2.1.5 ผลต่างของความดัน (Differential Pressure)

ผลต่างของความดัน (Differential Pressure, ΔP) [7] เป็นค่าความแตกต่างของความดัน (Pressure) ระหว่างจุดสองจุด มีค่าเป็นศูนย์เมื่อความดันทั้งสองจุดที่วัดมีค่าเท่ากัน ตัวอย่างการประยุกต์ใช้งาน เช่น การวัดความดันแตกต่างเพื่อคำนวณหาอัตราการไหล (Flow Measurement) หรือการวัดความดันแตกต่างที่ด้านหน้าและด้านหลังของตัวกรองเพื่อประเมินอายุการใช้งาน หากมีค่าความดันแตกต่างมากแสดงว่ามีสิ่งสกปรกติดค้างที่ตัวกรองมาก เป็นต้น



รูปที่ 2.9 โครงสร้างของท่อเวนจูรี [7]

การวัดอัตราการไหลด้วยท่อเวนจูรีอาศัยหลักการวัดความดันแตกต่าง (ΔP) [5] ระหว่างจุด 2 จุดที่ของไหลไหลผ่าน และคำนวณหาอัตราการไหลโดยใช้ทฤษฎีของแบร์นูลลี เช่นเดียวกับการวัดการไหลด้วยแผ่นออริฟิส (ตั้งสมการ) โดยตำแหน่งในการติดตั้งจุดวัดความดันพิจารณาจุด 2 จุดที่มีค่าความดันแตกต่างกันมากที่สุด นั่นคือ จุดที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อเวนจูรีใหญ่ที่สุด (D) และจุดที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อเวนจูรีเล็กที่สุด (d) (รูปที่ 2.9)

$$Q = K\sqrt{\Delta P}$$

โดย K คือ ค่าคงที่ของท่อและชนิดของของไหล ($\text{m}^3/\text{s}/\text{psi}$)

ΔP คือ ค่าความดันแตกต่างระหว่างจุดสองจุดที่ของไหลไหลผ่าน (psi)

2.2 ความดันบรรยากาศ

“ความดันบรรยากาศ หมายถึง [3] ค่าของแรงดันอากาศต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่” ในการพยากรณ์อากาศ เรียกความดันอากาศว่า ความกดอากาศ

อากาศที่ห่อหุ้มโลกเรียกว่า บรรยากาศ บรรยากาศที่ห่อหุ้มโลกมีความหนาประมาณ 1,000 กิโลเมตรบรรยากาศชั้นล่างๆ จะมีปริมาณของแก๊สที่เป็นส่วนประกอบของอากาศมากกว่าบรรยากาศชั้นบนๆ ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชั้นบน ยิ่งสูงขึ้นไปอากาศจะยิ่งเบาบางลง และเนื่องจากอากาศมีน้ำหนัก ดังนั้นน้ำหนักอากาศกดลงบนพื้นผิวโลก ทำให้เกิดแรงดันอากาศกระทำต่อพื้นผิวโลก

แรงดันอากาศที่กระทำต่อพื้นที่ 1 ตารางหน่วย เรียกว่า ความดันบรรยากาศหรือความกดอากาศความดันเนื่องจากน้ำหนักอากาศที่อยู่เหนือผิวโลก เรียกว่า ความดันบรรยากาศ

ความดันอากาศที่ระดับสูงขึ้นไป เช่น บนยอดเขาสูงๆ มีความดันอากาศน้อยกว่าที่ระดับน้ำทะเล นอกจากนี้ ลมและอุณหภูมิก็เป็นสาเหตุที่ทำให้ความดันอากาศมีค่าเปลี่ยนแปลง อากาศมีแรงดันทุกทิศทาง เมื่ออากาศถูกบีบอัดให้มีปริมาตรน้อยลงและมีความดันมากขึ้น อากาศขยายตัวเมื่อได้รับความร้อนและหดตัวเมื่อคายความร้อน

$$\begin{aligned} \text{ความดันบรรยากาศ} &= 76 \text{ เซนติเมตรของปรอท} \\ &= 760 \text{ มิลลิเมตรของปรอท} \\ &= 1.01325 \text{ บาร์} \\ &= 1.01 \times 10 \text{ N/m} \end{aligned}$$

ตารางที่ 2.1 ตารางแสดงหน่วยต่างๆ ของความดัน [3]

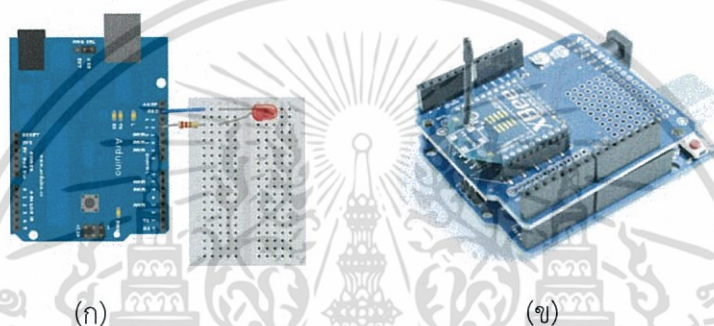
Convert from Atmosphere to:	Correlation	Formula
Dyne per (square centimeter)	1 atm = 1.01325 × 10 ⁶ dyn/cm ²	Dyn/cm ² = atm × 1.01325 × 10 ⁶
Millibar	1 atm = 1013.25 mbar	mbar = atm × 1013.25
Bar	1 atm = 1.01325 b	b = atm × 1.01325
Pascal	1 atm = 101,325 Pa	Pa = atm × 101,325
hectopascal	1 atm = 1,013.25 hPa	hPa = atm × 1,013.25
kilopascal	1 atm = 101.325 KPa	KPa = atm × 101.325
megapascal	1 atm = 0.101325 MPa	MPa = x atm 0.101325
Torr	1 atm = 760 torr	Torr = atm × 760
Millimeter of mercury	1 atm = 760 mmHg	mmHg = atm × 760
Inch of mercury	1 atm = 29.9212598 inHg	inHg = atm × 29.9212598
Millimeter of water	1 atm = 10332.276 mmH ₂ O	mmH ₂ O = atm × 10332.276
Inch of water	1 atm = 406.782519 inH ₂ O	inH ₂ O = atm × 406.782519
Pound-force per (square inch)	1 atm = 14.695948798 psi	psi = atm × 14.695948798

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3 อาดูโน

Arduino (อ่านว่า อา-ดู-อิ-โน้ หรือ อาดูยโน้) เป็นบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล AVR ที่มีการพัฒนาแบบ Open Source คือมีการเปิดเผยข้อมูลทั้งด้าน Hardware และ Software ตัวบอร์ด Arduino ถูกออกแบบมาให้ใช้งานได้ง่าย ดังนั้นจึงเหมาะสำหรับผู้เริ่มต้นศึกษา ทั้งนี้ผู้ใช้งานยังสามารถดัดแปลง เพิ่มเติม พัฒนาต่อยอดทั้งตัวบอร์ด หรือโปรแกรมต่อได้อีกด้วย [10]

ความง่ายของบอร์ด Arduino ในการต่ออุปกรณ์เสริมต่างๆ คือผู้ใช้งานสามารถต่อวงจรอิเล็กทรอนิกส์จากภายนอกแล้วเชื่อมต่อเข้ามาที่ขา I/O ของบอร์ด (ดูตัวอย่างรูปที่ 2.9) หรือเพื่อความสะดวกสามารถเลือกต่อกับบอร์ดเสริม (Arduino Shield) ประเภทต่างๆ(ดูตัวอย่างรูปที่ 2.9 (ข)) เช่น Arduino XBee Shield, Arduino Music Shield เป็นต้น มาเสียบกับบอร์ดบนบอร์ด Arduino แล้วเขียนโปรแกรมพัฒนาต่อได้เลย [10]

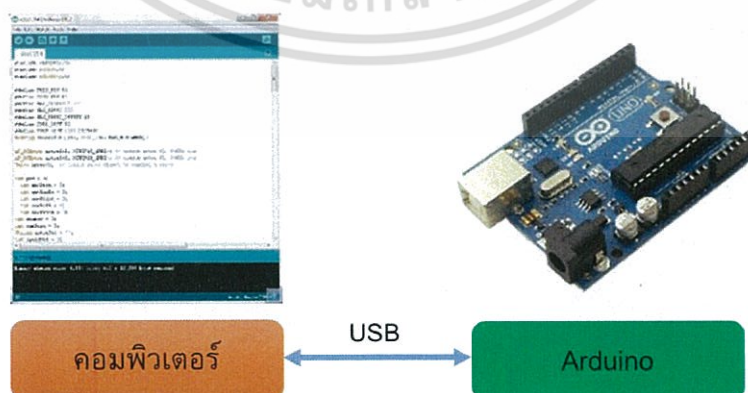


รูปที่ 2.10 (ก) บอร์ด Arduino ต่อกับ LED (ข) บอร์ด Arduino ต่อกับ บอร์ด XBee Shield [10]

2.3.1 จุดเด่นที่ทำให้บอร์ดอาดูโนเป็นที่นิยม

ง่ายต่อการพัฒนา มีรูปแบบคำสั่งพื้นฐาน ไม่ซับซ้อนเหมาะสำหรับผู้เริ่มต้น , มี Arduino Community กลุ่มคนที่ร่วมกันพัฒนาที่แข็งแกร่ง, Open Hardware ทำให้ผู้ใช้งานสามารถนำบอร์ดไปต่อยอดใช้งานได้หลายด้าน, Cross Platform สามารถพัฒนาโปรแกรมบน OS ใดก็ได้ [10]

2.3.2 รูปแบบการเขียนโปรแกรมบนอาดูโน

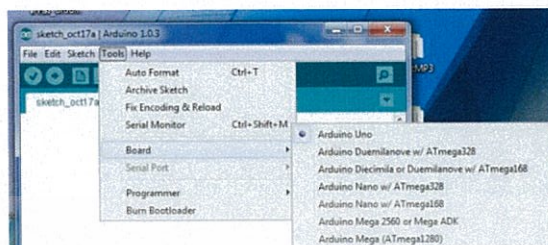


รูปที่ 2.11 รูปแบบการเขียนโปรแกรมบนอาดูโน [10]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.2.1 เขียนโปรแกรมบนคอมพิวเตอร์ ผ่านทางโปรแกรมอาดูโน ไอดีอี (Arduino IDE) ซึ่งสามารถดาวน์โหลดได้จาก Arduino.cc/en/main/software

2.3.2.2 หลังจากที่เขียนโค้ดโปรแกรมเรียบร้อยแล้ว ให้ผู้ใช้งานเลือกรุ่นบอร์ดอาดูโน ที่ใช้และหมายเลข Com port

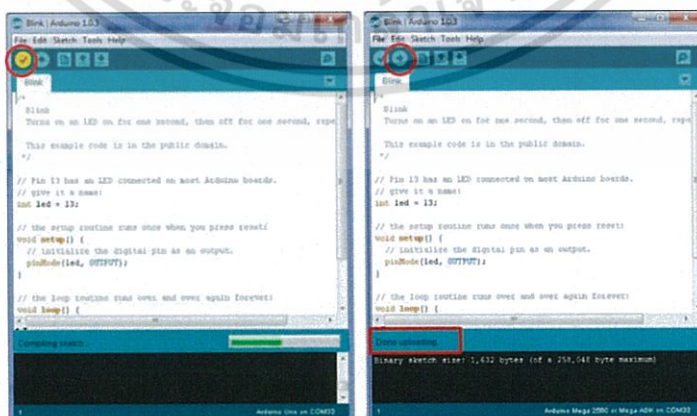


รูปที่ 2.12 เลือกรุ่นบอร์ดอาดูโนที่ต้องการ upload [10]



รูปที่ 2.13 เลือกหมายเลข Comport ของบอร์ด [10]

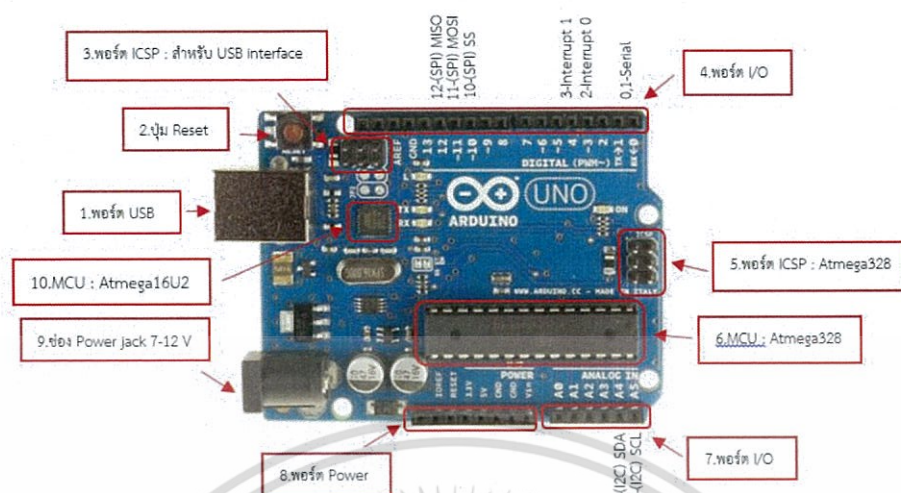
2.3.2.3 กดปุ่ม Verify เพื่อตรวจสอบความถูกต้องและ Compile โค้ดโปรแกรมจากนั้น กดปุ่ม Upload โค้ด โปรแกรมไปยังบอร์ดอาดูโน ผ่านทางสาย USB เมื่ออัปโหลดเรียบร้อยแล้ว จะแสดงข้อความแถบข้างล่าง “Done uploading” และบอร์ดจะเริ่มทำงานตามที่เขียนโปรแกรมไว้ได้ทันที



รูปที่ 2.14 กดปุ่ม Verify เพื่อตรวจสอบความถูกต้อง และ Compile โค้ดโปรแกรม Upload โค้ดโปรแกรม [10]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.3 Layout & Pin out Arduino Board (Model: Arduino UNO R3)



รูปที่ 2.16 บอร์ด Arduino [10]

2.3.3.1 USB Port: ใช้สำหรับต่อกับ Computer เพื่ออัปโหลดโปรแกรมเข้า MCU และจ่ายไฟให้กับบอร์ด

2.3.3.2 Reset Button: เป็นปุ่ม Reset ใช้กดเมื่อต้องการให้ MCU เริ่มการทำงานใหม่

2.3.3.3 ICSP Port: ของ Atmega16U2 เป็นพอร์ตที่ใช้โปรแกรม Visual Com port บน Atmega16U2

2.3.3.4 I/O Port: Digital I/O ตั้งแต่ขา D0 ถึง D13 นอกจากนี้ บาง Pin จะทำหน้าที่อื่นๆ เพิ่มเติมด้วย เช่น Pin0,1 เป็นขา Tx, Rx Serial, Pin3,5,6,9,10 และ 11 เป็นขา PWM

2.3.3.5 ICSP Port: Atmega328 เป็นพอร์ตที่ใช้โปรแกรม Boot loader

2.3.3.6 MCU: Atmega328 เป็น MCU ที่ใช้บนบอร์ด Arduino

2.3.3.7 I/O Port: นอกจากจะเป็น Digital I/O แล้ว ยังเปลี่ยนเป็น ช่องรับสัญญาณอนาล็อก ตั้งแต่ขา A0-A5

2.3.3.8 Power Port: ไฟเลี้ยงของบอร์ดเมื่อต้องการจ่ายไฟให้กับวงจรภายนอก ประกอบด้วยขาไฟเลี้ยง +3.3 V, +5V, GND, V_{in}

2.3.3.9 Power Jack: รับไฟจาก Adapter โดยที่แรงดันอยู่ระหว่าง 7-12 V

2.3.3.10 MCU: ของ Atmega16U2 เป็น MCU ที่ทำหน้าที่เป็น USB to Serial โดย Atmega328 จะติดต่อกับ Computer ผ่าน Atmega16U2

2.4 สเต็ปเปอร์มอเตอร์ (Stepper Motor)

สเต็ปเปอร์มอเตอร์ [11] เป็นมอเตอร์ที่มีการหมุนเป็นสเต็ป (Step) เมื่อจ่ายกระแสไฟฟ้าไปยังขดลวดที่พันอยู่บนสเตเตอร์ (Stator) ในลักษณะเป็นพัลส์ (Pulse)

ในกรณีที่จ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับขดลวดขดนั้นของสเต็ปเปอร์มอเตอร์ตลอดเวลา ก็จะเกิดการหมุนเพียงหนึ่งสเต็ปเท่านั้นซึ่งต่างจาก DC มอเตอร์เมื่อจ่ายกระแสไฟฟ้าให้ ก็จะหมุนตามจนกว่าจะหยุดจ่ายกระแสไฟฟ้าให้

2.4.1 ข้อดีของสเต็ปเปอร์มอเตอร์เมื่อเปรียบเทียบกับ DC มอเตอร์

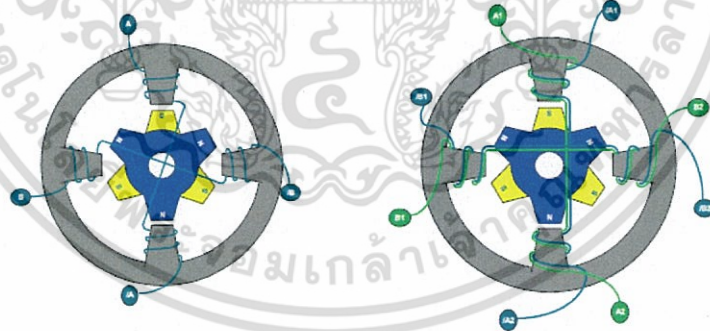
1. สามารถใช้ในงานควบคุมตำแหน่งในลักษณะ วงจรควบคุมแบบเปิด (Open Loop Control) ได้ โดยที่ไม่ต้องการสัญญาณป้อนกลับ (Feedback signal) แต่อาศัยการนับจำนวนของพัลส์ที่ส่งไปควบคุมการหมุนแทน
2. ไม่มีส่วนของแปรงถ่านที่จะสึกหรอและไม่เกิดการสปาร์คที่แปรงถ่านซึ่งอาจก่อให้เกิดสัญญาณรบกวน

2.4.2 เฟสของสเต็ปเปอร์มอเตอร์ (Stepper Motor Phase)

หมายถึง จำนวนขดลวดที่พันอยู่บนสเตเตอร์ซึ่งแยกออกจากกันอย่างอิสระ ในกรณีของมอเตอร์แบบยูนิโพลาร์ 2 เฟสนั้นมักถูกจะเรียกเป็นมอเตอร์ขนาด 4 เฟสก็เพราะขดลวดที่พันอยู่บนสเตเตอร์แต่ละขดจะมี 2 ขด จึงเข้าใจว่ามี 4 ขดลวด แต่ถ้าพิจารณาจริงๆจะพบว่าขดลวดทั้งสองนั้นเป็นขดลวดขดเดียวแต่มีจุดต่อตรงกลางขดเท่านั้นดังแสดงในรูปที่ 2.21

2.4.2.1 การพันลวดบนสเตเตอร์ของสเต็ปเปอร์มอเตอร์แบ่งออกได้ 2 แบบคือ

1. การพันแบบใช้ลวดเส้นเดียว (Unifilar)
2. การพันแบบใช้ลวด 2 เส้นพันไปด้วยกัน (Bifilar)



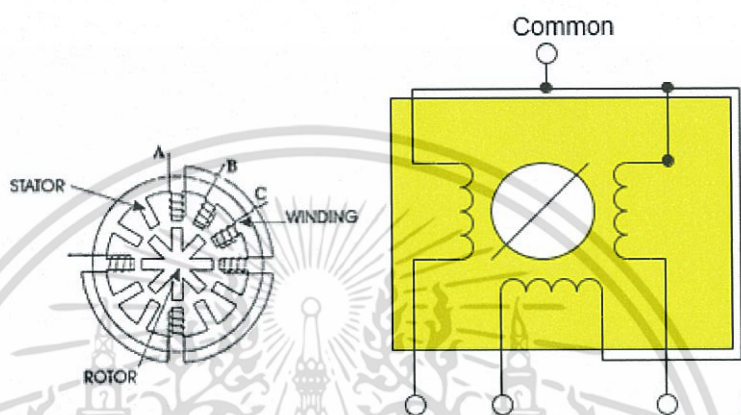
รูปที่ 2.17 ลักษณะการพันขดลวดบนสเตเตอร์ [11]

2.4.3 ชนิดของสเต็ปเปอร์มอเตอร์

2.4.3.1 วาริเอเบิลรีลักแตนซ์ (Variable Reluctance: VR)

คือ โรเตอร์ (Rotor) ทำด้วยเหล็กอ่อน รูปทรงกระบอกและทำ เป็นลักษณะฟัน (teeth) สเตเตอร์ (Stator) จะมีลวดพัน และจะทำเป็นลักษณะของฟันเช่นกัน เมื่อจ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับขดลวดที่สเตเตอร์จะเกิดเป็นขั้วแม่เหล็กที่ฟันของสเตเตอร์และเหนี่ยวนำ ให้ฟันของโรเตอร์เกิดเป็นขั้วแม่เหล็กที่มีขั้วตรงกันข้ามกับสเตเตอร์ทำให้ดึงดูดกันเกิดการหมุนของโรเตอร์ขึ้น มอเตอร์ชนิดนี้โดยปกติจะมีขนาด 3 เฟส ในบางครั้งอาจพบ ถึง 4 เฟส มอเตอร์ชนิดนี้ถ้าไม่จ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขดลวดบนสเตเตอร์ ตัวโรเตอร์จะไม่เกิดแรงดึงดูดกับสเตเตอร์ มอเตอร์ชนิดนี้ไม่นิยมนำไปใช้ในงานอุตสาหกรรมแต่จะถูกนำไปใช้กับงานที่มีขนาดเล็ก เช่น Micro-positioning table เป็นต้น เพราะไม่มีส่วนที่เป็นแม่เหล็กถาวรดังนั้นในขณะไม่จ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับขดลวดที่สเตเตอร์จึงไม่เกิดแรงดึงดูด วิธีการขับ (Driving) หรือการกระตุ้นเฟส (Phase Excitation) จะทำดังนี้คือ ต่อปลายด้าน common เข้ากับแหล่งจ่ายไฟขั้วบวก (+) แล้วทำการสวิตช์ให้ปลายด้าน A , B , C ต่อลงกราวด์ (Ground) ตามลำดับ ทีละปลายแล้วทำ เช่นนี้เรื่อยไป แต่ถ้าต้องการให้หมุนกลับก็สวิตช์ย้อนกลับ และในการอธิบายต่อจากนี้ไปจะไม่ขอกล่าวถึงมอเตอร์ชนิดนี้อีก

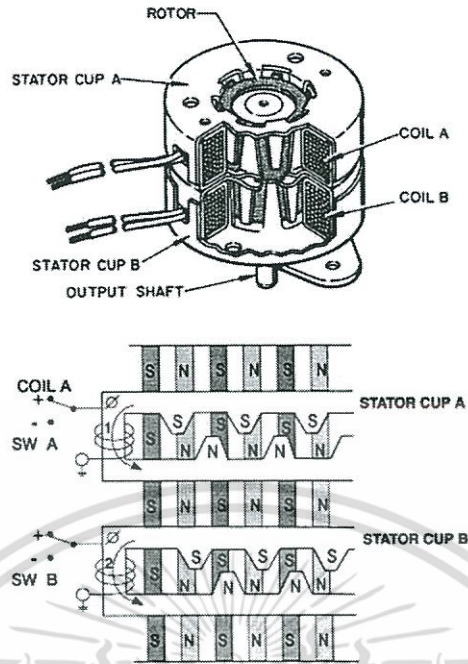


รูปที่ 2.18 โครงสร้างสเต็ปเปอร์มอเตอร์ชนิดวาริเอเบิลรีลักแตนซ์และสัญลักษณ์ [11]

2.4.3.2 แบบแม่เหล็กถาวร (Permanent Magnet : PM)

คือ โรเตอร์ (Rotor) ทำด้วยแม่เหล็กถาวรรูปทรงกระบอกเรียบ สเตเตอร์ (Stator) จะมีขดลวดพัน และก็จะทำเป็นฟันเมื่อจ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับขดลวดที่สเตเตอร์จะเกิดเป็นขั้วแม่เหล็กที่ฟันของสเตเตอร์และจะดึงดูดกับขั้วของแม่เหล็กถาวรที่โรเตอร์ทำให้เกิดการหมุนของโรเตอร์ขึ้นมอเตอร์ชนิดนี้โดยจะมีตั้งแต่ขนาด 2 เฟสขึ้นไปมอเตอร์ชนิดนี้ไม่นิยมนำไปใช้ในงานอุตสาหกรรมแต่จะถูกนำไปใช้กับอุปกรณ์คอมพิวเตอร์เช่นตัวขับเคลื่อนเพื่อเลื่อนกระดาดของเครื่องพิมพ์ เป็นต้น เพราะความเร็วต่ำ แรงบิดต่ำ และนอกจากนี้ด้วยโครงสร้างของมอเตอร์ชนิดนี้ทำให้มุมที่หมุนไปแต่ละสเต็ป (Step Angle) ไม่ละเอียดเช่น สเต็ปละ 3.6 , 7.5 , 15 , 18 องศา เป็นต้น

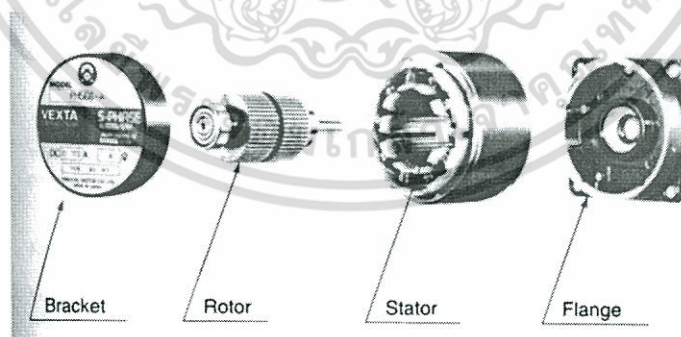
มอเตอร์ชนิดนี้ถึงไม่จ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับขดลวดบนสเตเตอร์ (Stator) ตัวโรเตอร์จะเกิดแรงดึงดูดกับสเตเตอร์ซึ่งเกิดจากอำนาจของแม่เหล็กถาวรที่โรเตอร์ทำให้หมุนได้ยาก จำนวนขั้วแม่เหล็กที่โรเตอร์สามารถ นับได้จากจำนวนขั้วแม่เหล็กที่จะเกิดขึ้นจากกระแสไฟฟ้าไหลผ่านขดลวดที่สเตเตอร์ชุดใดชุดหนึ่ง



รูปที่ 2.19 สเต็ปเปอร์มอเตอร์ชนิดเพอร์มาเนนต์แมกเน็ต [11]

2.4.3.3 แบบผสม (Hybrid: HB)

คือ ใช้หลักการทำงานของทั้งสองแบบมาออกแบบโดยที่สเตเตอร์จะคล้ายกับแบบ VR ส่วนโรเตอร์จะคล้ายแบบ PM แต่จะทำ เป็นฟัน มอเตอร์แบบนี้นิยมใช้ในงานอุตสาหกรรม เพราะแรงบิดสูงความละเอียดของสเต็ปในการหมุนสูง , ความเร็วสูงกว่าสองแบบที่กล่าวมาแล้ว มอเตอร์ชนิดนี้โดยปกติจะมีขนาด 2 เฟส ถึง 5 เฟส และมอเตอร์ชนิดนี้ได้มีการพัฒนาให้มีประสิทธิภาพ เหนือกว่าเดิมไปอีกโดยให้ชื่อว่า “Enhanced Hybrid”

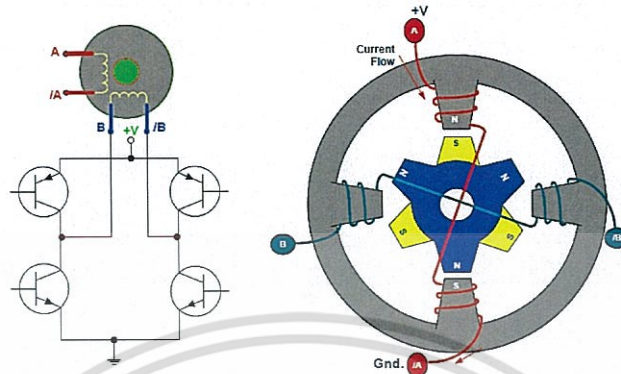


รูปที่ 2.20 สเต็ปเปอร์มอเตอร์ชนิดไฮบริดขนาด 5 เฟส [11]

2.4.3.4 ชนิดของสเต็ปเปอร์มอเตอร์แบ่งตามลักษณะสายที่ใช้ต่อกับวงจรขับแบ่งออกได้ 2 แบบ คือ

1. แบบไบโพลาร์ (Bipolar) ขดลวดที่สเตเตอร์แต่ละชุดจะไม่มีจุดร่วม การต่อเข้ากับวงจรขับจะใช้ปลายทั้งสองด้านของขดลวดแต่ละชุด การทำให้เกิดขั้วแม่เหล็กที่สเตเตอร์ทำได้โดยเอกสาร์ทที่จ่ายกระแสไฟจากปลายด้านหนึ่งไปยังปลายอีกด้านหนึ่งของขดลวดและการเปลี่ยนขั้วแม่เหล็กที่ค่าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

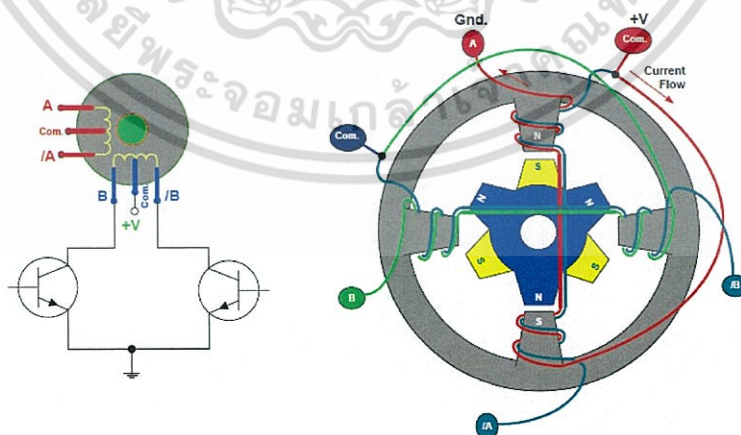
สแตเตอร์ชุดเดียวกันนี้ก็ได้โดยสลับทิศทางไหลของกระแสไฟฟ้านั้นเอง ดังนั้นวงจรขับที่ใช้จึงจำเป็นต้องสามารถกลับทิศทางไหลของกระแสได้ กรณีเป็นมอเตอร์ 2 เฟสจะมีสายที่ใช้ต่อเข้ากับวงจร 4 สาย



รูปที่ 2.21 สัญลักษณ์,โครงสร้างและวงจรขับที่ใช้กับมอเตอร์แบบไบโพลาร์ 2 เฟส [11]

2. แบบยูนิโพลาร์ (Unipolar) ขดลวดที่สแตเตอร์แต่ละชุดจะมีจุดร่วม การพันขดลวดจะพันในแบบ Bifilar การต่อเข้ากับวงจรขับจะใช้ปลายของขดลวดแต่ละด้านต่อเข้ากับวงจรขับ และใช้จุดร่วมต่อเข้ากับขั้วบวกของแหล่งจ่ายไฟ การทำให้เกิดขั้วแม่เหล็กที่สแตเตอร์ทำได้โดยการจ่ายกระแสไฟให้ไหลจากจุดร่วมลงกราวด์มาครบวงจรที่ปลายด้านหนึ่งของขดลวด การเปลี่ยนขั้วแม่เหล็กที่สแตเตอร์ชุดเดียวกันนี้ก็ได้โดยเปลี่ยนการจ่ายกระแสไฟฟ้าจากขดหนึ่งไปยังอีกขดหนึ่งของขดลวดที่พันอยู่บนสแตเตอร์ชุดเดียวกัน ดังนั้นวงจรขับจึงเป็นวงจรสวิตช์เพื่อทำให้จ่ายกระแสไฟที่ผ่านขดลวดครบวงจรเท่านั้น

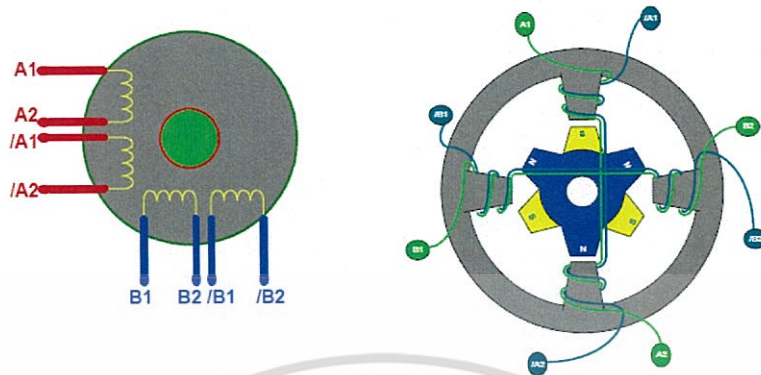
กรณีเป็นมอเตอร์ 2 เฟสจะมีสายที่ใช้ต่อเข้ากับวงจร 5 หรือ 6 สาย



รูปที่ 2.22 สัญลักษณ์,โครงสร้างและวงจรขับที่ใช้กับมอเตอร์แบบยูนิโพลาร์ 2 เฟส [11]

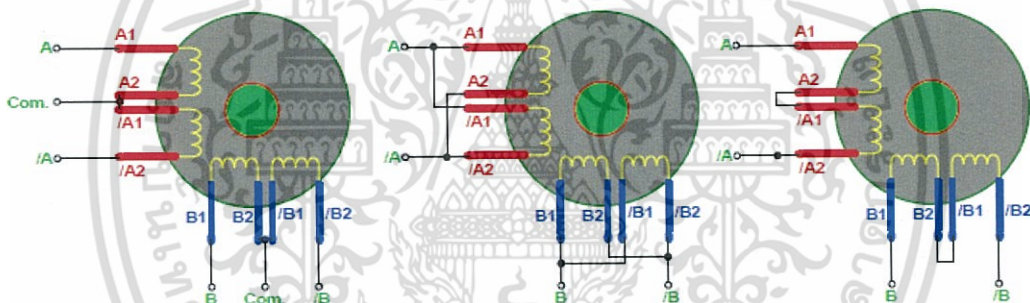
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สเต็ปเปอร์มอเตอร์ 2 เฟสที่มีการพันลวดแบบไบโพลาร์และแยกปลายแต่ละขดออกจากกันดังนั้นสามารถเลือกต่อเป็นแบบต่างๆได้ดังนี้



รูปที่ 2.23 สัญลักษณ์ ,โครงสร้างมอเตอร์ 2 เฟสที่พันลวดแบบไบโพลาร์และแยกปลายของแต่ละขด [11]

ตัวอย่างการต่อสาย



(ก) Unipolar Motor (ข) Bipolar Motor (Parallel) (ค) Bipolar Motor (Series)

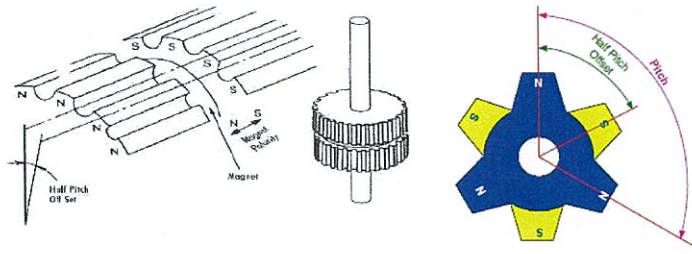
รูปที่ 2.24 สัญลักษณ์การต่อสายแบบต่างๆ [11]

มอเตอร์ที่ผลิตออกมาจำหน่ายและมีการพันลวดแบบไบโพลาร์บางรุ่นให้ผู้ใช้เลือกต่อเองเป็นแบบต่างๆแต่บางรุ่นก็ต่อภายในมาให้เสร็จ

2.4.3.5 โครงสร้างและการจัดตำแหน่งฟันที่โรเตอร์ของสเต็ปเปอร์มอเตอร์ชนิดไฮบริด

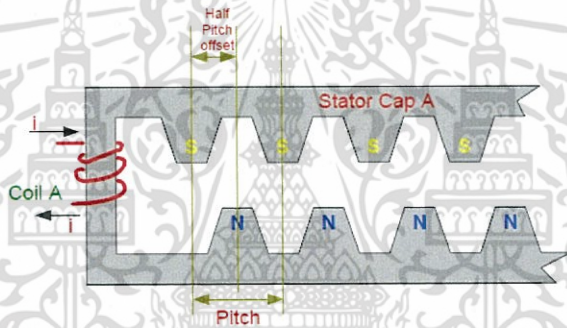
โครงสร้างของโรเตอร์จะประกอบด้วยแม่เหล็กถาวรรูปทรงกระบอกทำ เป็นฟันแบ่งออกเป็น 2 ชั้นคือชั้นของแม่เหล็กถาวรขั้วเหนือ (North Pole : N) และชั้นของแม่เหล็กถาวรขั้วใต้ (South Pole : S) โดยการวางตำแหน่งฟันของแม่เหล็กถาวรขั้วใต้จะอยู่ที่ตำแหน่งครึ่งพิช (Pitch) ของแม่เหล็กถาวรขั้วเหนือ และการวางตำแหน่งฟันของแม่เหล็กถาวรขั้วเหนือก็จะอยู่ที่ตำแหน่งครึ่งพิช (Pitch) ของแม่เหล็กถาวรขั้วใต้เช่นกัน

พิช (Pitch) หมายถึง ระยะห่างจากยอดฟันเฟือง 1 ไปยังยอดฟันเฟืองตัวถัดไป โดยการวัดจะวัดจากขอบไปยังขอบหรือจุดกึ่งกลางไปจุดกึ่งกลางก็ได้ พิชมีหน่วยเป็นองศา (มุม) หรือมีหน่วยเป็นมิลลิเมตร, นิ้ว (ความยาว)



รูปที่ 2.25 โครงสร้างและการจัดตำแหน่งฟันที่โรเตอร์ของสเต็ปเปอร์มอเตอร์ชนิดไฮบริด [11]

สเต็ปเปอร์มอเตอร์ชนิดเพอร์มาเนนต์แมกเน็ตตัวโรเตอร์เป็นรูปทรงกระบอกเรียบแต่ที่สเตเตอร์จะทำ เป็นลักษณะของฟัน เพื่อทำให้เกิดขั้วแม่เหล็กเหนือและใต้โดยแบ่งออกเป็นสองชุด การวางตำแหน่งฟันของขั้วแม่เหล็กชุดใดชุดหนึ่งจะมีลักษณะดังนี้คือตำแหน่งฟันแม่เหล็กถาวรขั้วใต้จะอยู่ที่ตำแหน่งครึ่งพิช (Pitch) ของแม่เหล็กถาวรขั้วเหนือและการวางตำแหน่งฟันของแม่เหล็กถาวรขั้วเหนือก็จะอยู่ที่ตำแหน่งครึ่งพิช (Pitch) ของแม่เหล็กถาวรขั้วใต้เช่นกัน



รูปที่ 2.26 โครงสร้างและการจัดตำแหน่งฟันที่สเตเตอร์ของสเต็ปเปอร์มอเตอร์ชนิดเพอร์มาเนนต์แมกเน็ต [11]

วิธีคำนวณหาจำนวนสเต็ปต่อรอบ (Steps per revolution) มุมใน 1 สเต็ป (Step angle) และพิช (Pitch)

จาก
$$\text{Step per rev.} = n \times m \times f$$

$$\text{Step angle} = \frac{360^\circ}{\text{Step per rev.}}$$

$$\text{Pitch} = \frac{360^\circ}{m}$$

เมื่อ n คือ จำนวนขั้วแม่เหล็กขั้วเหนือและขั้วใต้ทั้งหมดที่สเตเตอร์ (นับจำนวนฟันทั้งหมด)

m คือ จำนวนของขั้วแม่เหล็กที่โรเตอร์ (เลือกจากขั้วเดียว)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ของ บริษัท สยามคอมเพิลท์ จำกัด หากมีการนำข้อมูลไปใช้โดยไม่ได้รับอนุญาตจากบริษัทฯ ถือว่าผิดกฎหมาย และต้องรับผิดชอบต่อเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การเคลื่อนที่ของโรเตอร์จะเคลื่อนที่ไปครั้งละ $\frac{1}{4}$ ของพิช ดังนั้นสามารถคำนวณหา

Step angle ได้อีกวิธีหนึ่งดังนี้

จาก
$$\text{Step angle} = \frac{1}{4} \text{ Pitch}$$

ตัวอย่าง ใช้รูปที่ 2.21 ประกอบการคำนวณ

วิธีการคำนวณ	Step per rev. = $4 \times 3 \times 1$	= 12 สเต็ป (เมื่อใช้ตัวคงที่เท่ากับ 1)
	Step angle = $360 / 12$ สเต็ป	= 30 องศา
	Pitch = $360 / 3$ ฟัน	= 120 องศา
	Step angle = $(1/4) \times 120$ องศา	= 30 องศา

ในการทำให้สเต็ปเปอร์มอเตอร์มีจำนวนสเต็ปต่อรอบมากๆทำได้โดยการการเพิ่มจำนวนขั้วแม่เหล็กเหนือและใต้ที่โรเตอร์ให้มากขึ้น และที่ฟันของสเตเตอร์ที่ทำ ให้เกิดเป็นขั้วแม่เหล็ก (Pole) ก็จะทำให้เป็นฟันเล็กๆให้สัมพันธ์กับฟันที่โรเตอร์ แต่ถ้าไม่สามารถแก้ไขโครงสร้างได้วิธีการที่จะเพิ่มจำนวนสเต็ปต่อรอบทำได้โดยการเปลี่ยนวิธีขับหรือการกระตุ้นเป็นแบบ one – two phase excitation หรืออาจเรียกว่าแบบ half step



รูปที่ 2.27 โครงสร้างของสเต็ปเปอร์มอเตอร์ชนิดไฮบริด 2 เฟส
ที่มีจำนวนสเต็ปต่อรอบ 200 สเต็ป [11]

จากรูปที่ 2.27 ในสเต็ปที่ 1 จะเป็นการกระตุ้นเฟส A ดังนั้นจะเป็นผลให้แม่เหล็กขั้วใต้ของโรเตอร์อยู่ในตำแหน่งที่ตรงกับตำแหน่งฟันที่เป็นแม่เหล็กขั้วเหนือของสเตเตอร์ขั้วหมายเลข 1 และ 5 เกิดการดึงดูดกันในเวลาเดียวกันแม่เหล็กขั้วเหนือของโรเตอร์อยู่ในตำแหน่งที่ตรงกับฟันที่เป็นแม่เหล็กขั้วใต้ของสเตเตอร์ขั้วหมายเลข 3 และ 7 เกิดการดึงดูดกันเช่นกัน ที่ขั้วหมายเลข 2 , 6 , 4 และ 8 ฟันของสเตเตอร์จะทำมุมที่ห่างจากแม่เหล็กขั้วเหนือและใต้ของโรเตอร์ เป็นมุม 1.8 องศา หรือ $\frac{1}{4}$ Pitch ในสเต็ปที่ 2 จะเป็นการกระตุ้นเฟส B ดังนั้นจะเป็นผลให้แม่เหล็กขั้วใต้ของโรเตอร์อยู่ในตำแหน่งที่ตรงกับตำแหน่งฟันที่เป็นแม่เหล็กขั้วเหนือของสเตเตอร์ขั้วหมายเลข 2 และ 6 เกิดการดึงดูดกันในเวลาเดียวกันแม่เหล็กขั้วเหนือของโรเตอร์อยู่ในตำแหน่งที่ตรงกับฟันที่เป็นแม่เหล็กขั้วใต้ของสเตเตอร์ขั้ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หมายเลข 4 และ 8 เกิดการดึงดูดกันเช่นกัน ที่ข้อหมายเลข 1 , 5 , 3 และ 7 ฟันของสเตเตอร์จะทำมุมที่ห่างจากแม่เหล็กขั้วเหนือและใต้ของโรเตอร์ เป็นมุม 1.8 องศา หรือ $\frac{1}{4}$

ตัวอย่าง ใช้รูปที่ 2.27 ประกอบการคำนวณ

วิธีการคำนวณ	Step per rev. = $40 \times 50 \times 1$	= 200 สเต็ป (เมื่อใช้ตัวคองที่เท่ากับ1)
	Step angle = $360 / 200$ สเต็ป	= 1.8 องศา
	Pitch = $360 / 50$ ฟัน	= 7.2 องศา
	Step angle = $(1/4) \times 7.2$ องศา	= 1.8 องศา

2.4.4 วิธีการขับ (Driving) หรือวิธีการกระตุ้นเฟส (Phase Excitation) ของสเต็ปเปอร์มอเตอร์

การกระตุ้นเฟสของสเต็ปเปอร์มอเตอร์ คือ การจ่ายกระแสไฟฟ้าไปยังขดลวดที่สเตเตอร์ของแต่ละเฟสเพื่อทำให้มอเตอร์หมุนนั่นเอง แบ่งออกเป็น 3 วิธีคือ

1. การกระตุ้นเฟสแบบ One phase excitation หรือ Wave หรือ Half Drive เป็นการกระตุ้นเฟสแบบนี้ทำได้โดยการจ่ายกระแสไฟฟ้าไปยัง ขดลวดครึ่งละหนึ่งขดบนสเตเตอร์ดังนี้

ตารางที่ 2.2 การกระตุ้นเฟสแบบ One phase excitation หรือ Wave หรือ Half Drive [11]

Step	Unipolar		Bipolar	
	Supply		Supply	
	+V	Gnd.	+V	Gnd.
1	Com.	A	A	/A
2	Com.	B	B	/B
3	Com.	/A	/A	A
4	Com.	/B	/B	B

2. การกระตุ้นเฟสแบบ Two phase excitation หรือ Full Step เป็นการกระตุ้นเฟสแบบนี้ทำได้โดยการจ่ายกระแสไฟฟ้าไปยังขดลวดครึ่งละสองขดที่อยู่ใกล้กันบนสเตเตอร์ดังนี้

ตารางที่ 2.3 การกระตุ้นเฟสแบบ Two phase excitation หรือ Full Step [11]

Step	Unipolar		Bipolar	
	Supply		Supply	
	+V	Gnd.	+V	Gnd.
1	Com.	A , B	A , B	/A , /B
2	Com.	B	B	/B
3	Com.	/A , B	/A , B	A , /B
4	Com.	/A	/A	A

ตารางที่ 2.3 (ต่อ) การกระตุ้นเฟสแบบ Two phase excitation หรือ Full Step [11]

Step	Unipolar		Bipolar	
	Supply		Supply	
	+V	Gnd.	+V	Gnd.
5	Com.	/A , /B	/A , /B	A , B
6	Com.	/B	/B	B
7	Com.	A , /B	A , /B	/A , B
8	Com.	A	A	/A


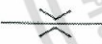


หมายเหตุ 1.ค่าคงที่ (f) ที่ใช้ในการคำนวณหา Step per Rev.

วิธีที่1 และ 2 มีค่าเท่ากับ 1 ส่วนวิธีที่ 3 มีค่าเท่ากับ 2

2.5 วาล์ว

ในงานอุตสาหกรรมปัจจุบัน “วาล์ว” [2] มีบทบาทสำคัญมาก จึงเป็นเหตุผลที่จะต้องศึกษาเรื่องนี้โดยเฉพาะอย่างยิ่งผู้ที่ทำงานด้านซ่อมบำรุงหน้าที่หลักของวาล์วในระบบควบคุมของไหลมีสามหน้าที่ได้แก่ หยุดและเริ่มการไหล การควบคุมอัตราการไหล และ การเบี่ยงเบนเปลี่ยนทิศทางการไหล โดยวาล์วได้ถูกออกแบบมาหลายชนิดเพื่อให้เหมาะกับการใช้งานในแต่ละการทำงานซึ่งในงานวิจัยนี้จะประยุกต์กับ Mechanical Valve คือวาล์วควบคุมทิศทางการไหลของก๊าซหรือของเหลว โดยการสั่งงานด้วยมือ

อุปกรณ์ที่จะทำหน้าที่ควบคุมปริมาณการไหล เรียกว่า วาล์วควบคุมอัตราการไหล วาล์วปรับอัตราการไหล (Flow Control Valve) แบ่งออกได้หลายชนิดดังสัญลักษณ์ ดังนี้

1.  วาล์วคอคอด (throttle valve)
2.  วาล์วช่องแคบ (orifice valve)
3.  วาล์วคอคอดแบบปรับได้ (variable throttle valve)
4.  วาล์วช่องแคบปรับได้ (variable orifice valve)

2.5.1 ชนิดของวาล์ว มี 4 ชนิดใหญ่ๆ คือ

2.5.1.1 วาล์ว ควบคุม (Control Valves)

- ปกติ ปิดสุด, เปิดบางส่วน, เปิดสุด
- การใช้งานเพื่อปรับหรือควบคุมการไหลของของเหลวหรือก๊าซ
- การควบคุมนั้น สามารถออกแบบให้ควบคุมได้ทั้ง ความเร็ว,ความดัน, ปริมาณ หรืออุณหภูมิ สุดแล้วแต่จะต้องการ

2.5.1.2 วาล์ว ปิด-เปิด อัตโนมัติ (Automatic Valves)

- ปกติ ปิดสุด หรือ เปิดสุด
- การใช้งานเพื่อตัดอุปกรณ์ต่างๆ ออกจากระบบ

2.5.1.3 วาล์ว กันกลับ (Check Valves)

- ปกติ ปิด หรือ เปิด
- การใช้งาน เพื่อควบคุมทิศทางการไหล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5.1.4 วาล์ว ควบคุมความดันสูงสุด (Maximum Pressure Control Valve แบ่งออกเป็น 2 ชนิด

1. รีลิว วาล์ว (Relief valves) เป็นวาล์วนิรภัยประเภทที่ใช้งานทั้งกับก๊าซและของเหลว โดยจะรักษาควบคุมความดันให้ได้ตามที่ตั้งเอาไว้ เช่น รีลิววาล์วของอุปกรณ์ ไฮดรอลิกปั๊ม (hydraulic pumping system)

2. เซฟตี้ วาล์ว (Safety valves) เป็นวาล์วนิรภัยที่ใช้กับ ก๊าซหรือไอน้ำเท่านั้น จะเริ่มเปิดเมื่อถึงความดันที่ตั้งไว้ และจะเปิดเต็มที่เมื่อความดันสูงกว่าที่ตั้งไว้ 3% จากนั้น เมื่อความดันลดลงมาต่ำกว่า 3 % จึงจะปิด

2.5.2 การออกแบบวาล์ว (Valve Design)

โดยทั่วไปชื่อที่ใช้เรียกชิ้นส่วนของ วาล์ว นั้นเหมือนกัน เพราะเวลาใช้งานทำหน้าที่เหมือนกัน จะแตกต่างกันไปก็เฉพาะรูปร่างหน้าตา, ขนาด, วัสดุที่ใช้, ลักษณะงาน, ความดันที่ทนได้, อุณหภูมิที่ทนได้, เท่านั้น โดยทั่วไปแล้วส่วนสำคัญของ วาล์ว คือ หน้า วาล์ว อันได้แก่ ดิสก์ (disc valve) และ ซีท (seat valve) นอกจากนั้นชิ้นส่วนอื่นๆ จะออกแบบมาให้เหมาะสมกับการใช้งานนั้นๆ

2.5.2.1 การกำหนดขนาดของวาล์ว

โดยปกติเรียกตามขนาดของ pipe หรือ tube เช่น 2" pipe = 2" valve

2.5.2.2 ชนิดของปลายวาล์วที่ใช้เชื่อมต่อกับท่อ

1. เป็นแบบเกลียวท่อ (screw pipe thread)
2. เป็นแบบชนเชื่อม (butt-weld)
3. เป็นแบบสวมเชื่อม (socket weld)
4. เป็นแบบหน้าแปลน (flange)
5. เป็นแบบสวมอัด (swaged)

ในการออกแบบหรือติดตั้ง จะต้องคำนึงถึงสิ่งต่อไปนี้ เพื่อความปลอดภัยและยืดอายุการใช้งานให้นานที่สุด [6]

1. ความดัน (Pressure) : ได้แก่ ความหนา, การออกแบบ seat, การออกแบบ actuator
2. อุณหภูมิ (Temperature) : ได้แก่ โลหะ, การออกแบบ seat, เลือกชนิด packing การยืด หด ขยายตัว
3. ปริมาณ (Volume) : ได้แก่ จะให้สามารถต้านการไหลเท่าไร, ลักษณะการไหลเป็นแบบใด (flow pattern), การออกแบบ actuator
4. การควบคุม (Control) : ได้แก่ ออกแบบ seat, ออกแบบ stem, ออกแบบ actuator
5. ชนิดของของไหล (type of fluid) : ได้แก่ น้ำ, น้ำมัน, แก๊ส ไอน้ำ (water, oil, gas, steam)
6. สารเจือปน (Purity of fluid) : ได้แก่ เรื่องสารที่เป็นของแข็งในของไหลที่จะผ่านวาล์ว ทำให้เกิดการสึกกร่อนได้
7. ความเป็นกรดต่าง (pH) : ได้แก่ การออกแบบให้ทนต่อการกัดกร่อนของสารเคมี
8. การต้านทานการไหล (Flow restrictions) : ได้แก่ การออกแบบ วาล์ว ให้มีประสิทธิภาพ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.6 เซ็นเซอร์ตรวจจับผลต่างของความดัน (Differential Pressure Sensor)

เซ็นเซอร์ตรวจจับผลต่างของความดัน หรือ Differential Pressure [15] คืออุปกรณ์วัดความดันที่เปรียบเทียบความดันทั้งสองด้าน เช่น ด้านเข้าและออกได้ เพื่อตรวจสอบการอุดตันของระบบหรือไม่ เหมาะสำหรับการตรวจสอบการอุดตันของแผ่นกรองอากาศเป็นต้น

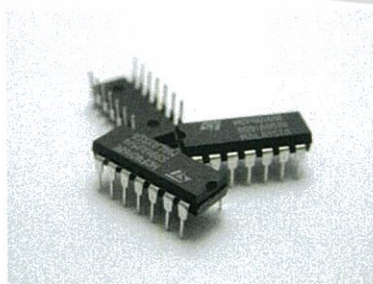


รูปที่ 2.28 เซ็นเซอร์ตรวจจับผลต่างของความดัน (Differential Pressure Sensors) [15]

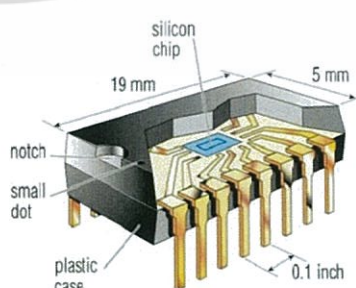
ผลต่างของความดันหรือความดันดิฟเฟอเรนเชียล (differential pressure, ΔP) เป็นค่าความแตกต่างของความดัน (Pressure) ระหว่างจุดสองจุด มีค่าเป็นศูนย์เมื่อความดันทั้งสองจุดที่วัดมีค่าเท่ากัน ตัวอย่างการประยุกต์ใช้งาน เช่น การวัดผลต่างของความดัน เพื่อคำนวณหาอัตราการไหล (flow measurement) หรือ การวัดผลต่างของความดันที่ด้านหน้าและด้านหลังของตัวกรองเพื่อประเมินอายุการใช้งาน หากมีค่าความดันแตกต่างมากแสดงว่ามีสิ่งสกปรกติดค้างที่ตัวกรองมาก เป็นต้น [16]

2.7 ไอซี (IC: integrated circuit)

วงจรรวม หรือ วงจรเบ็ดเตล็ด (integrated circuit : IC) หมายถึง [5] วงจรที่นำเอาไดโอด ทรานซิสเตอร์ ตัวต้านทาน ตัวเก็บประจุ และองค์ประกอบวงจรต่างๆ มาประกอบรวมกันบนแผ่นวงจรมินิเจอร์ ในปัจจุบันแผ่นวงจรมินิเจอร์นี้จะทำด้วยแผ่นซิลิคอน บางที่อาจเรียกว่า ชิพ (Chip) และสร้างองค์ประกอบวงจรต่างๆ ฝังอยู่บนแผ่นผลึกนี้ ส่วนใหญ่เป็นชนิดที่เรียกว่า Monolithic การสร้างองค์ประกอบวงจรมินิเจอร์นี้ จะใช้กรรมวิธีทางด้านภาพถ่ายและเลเซอร์ ผสมกับขบวนการทางเคมีทำให้ลายวงจรมีความละเอียดสูงมาก ภายในไอซี จะมีส่วนของลอกจิกมากมาย เช่น ไมโครโพรเซสเซอร์ ซึ่งใช้ทำงานควบคุม คอมพิวเตอร์



(ก)



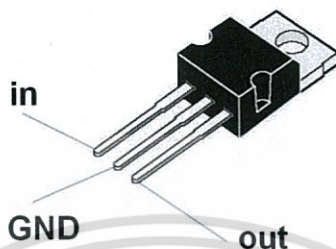
(ข)

รูปที่ 2.29 (ก) ลักษณะ IC ทั่วไป (ข) ลักษณะภายในของ IC [5]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.7.1 ไอซีเร็กกูเลเตอร์ (IC Regulator)

ไอซีเร็กกูเลเตอร์สามขาชนิดจ่ายแรงดันคงที่ ไอซีเร็กกูเลเตอร์ภายในประกอบด้วยวงจรเร็กกูเลเตอร์แบบอนุกรม มีขาต่อใช้งาน 3 ขา ประกอบด้วยขา อินพุท เอาท์พุท และกราวด์ ซึ่งจะจ่ายแรงดันค่าใดค่าหนึ่งโดยเฉพาะ โดยรวมเอาส่วนของวงจรป้อนกลับที่ประกอบด้วย R_1 และ R_2 ที่ 3 เข้าไว้เป็นส่วนหนึ่งของไอซี ซึ่งจุดนี้เองที่แตกต่างไปจากไอซีเร็กกูเลเตอร์ที่ปรับค่าได้

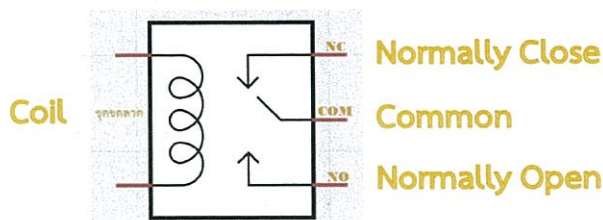


รูปที่ 2.30 โครงสร้างของไอซีเร็กกูเลเตอร์ [17]

จุดเด่นของไอซีเร็กกูเลเตอร์ค่าคงที่นี้คือ สามารถต่อวงจรได้ง่ายไม่ต้องต่ออุปกรณ์ภายนอกเพิ่มเติมมากนัก ในการต่อวงจรบางครั้งจำเป็นต้องต่อไอซีเร็กกูเลเตอร์ห่างจากแหล่งจ่ายไฟอินพุทเกิน 5 เซนติเมตร จึงควรใส่ตัวเก็บประจุเล็กทรอไลต์ ขนาดประมาณ 10 ไมโครฟารัด สักตัวไว้ด้านอินพุท เพื่อป้องกันการเกิดออสซิลเลชันที่ความถี่สูง ซึ่งจะทำให้วงจรขาดเสถียรภาพ เอาท์พุทที่ออกจากไอซีเร็กกูเลเตอร์ จะได้แรงดันเอาท์พุทที่เรียบพอสมควรอยู่แล้ว แต่อาจจะใส่ตัวเก็บประจุที่มีค่าประมาณ 100 ไมโครฟารัด เพื่อช่วยปรับปรุ้งแรงดันให้เรียบขึ้น ถึงแม้ว่าแรงดันไอซีเร็กกูเลเตอร์ชนิดนี้จะให้แรงดันเอาท์พุทคงที่ มีเบอร์ให้เลือกแรงดันเอาท์พุทได้คงที่หลายเบอร์เช่น 5 V, 5.2 V, 6V, 8V, 10V, 12V, 15V, 18V และ 24V กระแสเอาท์พุทตั้งแต่ 10 มิลลิแอมป์ ถึง 3 แอมป์ และมีให้เลือกทั้งชนิดเร็กกูเลเตอร์ไฟบวกและเร็กกูเลเตอร์ไฟลบ

2.8 รีเลย์ (Relay Module)

เป็นอุปกรณ์ไฟฟ้าชนิดหนึ่ง ซึ่งทำหน้าที่ตัดต่อวงจรแบบเดียวกับสวิตช์ โดยควบคุมการทำงานด้วยไฟฟ้า Relay มีหลายประเภท ตั้งแต่ Relay ขนาดเล็กที่ใช้ในงานอิเล็กทรอนิกส์ทั่วไป จนถึง Relay ขนาดใหญ่ที่ใช้ในงานไฟฟ้าแรงสูง โดยมีรูปร่างหน้าตาแตกต่างกันออกไป แต่มีหลักการการทำงานที่คล้ายคลึงกัน สำหรับการนำ Relay ไปใช้งาน จะใช้ในการตัดต่อวงจร ทั้งนี้ Relay ยังสามารถเลือกใช้งานได้หลากหลายรูปแบบ [9]



รูปที่ 2.31 สัญลักษณ์ในวงจรไฟฟ้าของรีเลย์ [9]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

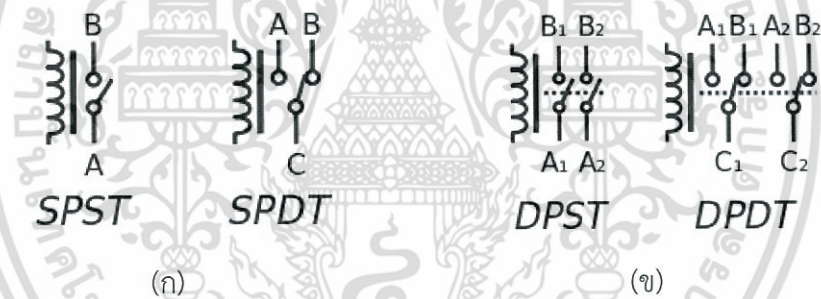
2.8.1 ภายใน Relay จะประกอบไปด้วยขดลวดและหน้าสัมผัส

1. หน้าสัมผัส NC (Normally Close) เป็นหน้าสัมผัสปกติปิด โดยในสภาวะปกติ หน้าสัมผัสนี้จะต่อเข้ากับขา COM (Common) และจะลดยหรือไม่สัมผัสกันเมื่อมีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านขดลวด

2. หน้าสัมผัส NO (Normally Open) เป็นหน้าสัมผัสปกติเปิด โดยในสภาวะปกติจะลดยอยู่ไม่ถูกต้องกับขา COM (Common) แต่จะเชื่อมต่อกันเมื่อมีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านขดลวด

3. ขา COM (Common) เป็นขาที่ถูกใช้งานร่วมกันระหว่าง NC และ NO ขึ้นอยู่กับว่าขณะนั้นมีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านขดลวดหรือไม่ หน้าสัมผัสใน Relay 1 ตัวอาจมีมากกว่า 1 ชุด ขึ้นอยู่กับผู้ผลิตและลักษณะของงานที่ถูกนำไปใช้ จำนวนหน้าสัมผัสถูกแบ่งออกดังนี้

สวิตช์จะถูกแยกประเภทตามจำนวน Pole และจำนวน Throw ซึ่งจำนวน Pole (SP-Single Pole, DP-Double Pole, 3P-Triple Pole, etc.) จะบอกถึงจำนวนวงจรที่ทำการเปิด-ปิด หรือ จำนวนของขา COM นั้นเอง และจำนวน Throw (ST, DT) จะบอกถึงจำนวนของตัวเลือกของ Pole ตัวอย่างเช่น SPST- Single Pole Single Throw สวิตช์จะสามารถเลือกได้เพียงอย่างเดียวโดยจะเป็นปกติเปิด (NO-Normally Open) หรือปกติปิด (NC-Normally Close) แต่ถ้าเป็น SPDT-Single Pole Double Throw สวิตช์จะมีหนึ่งคู่เป็นปกติเปิด (NO) และอีกหนึ่งคู่เป็นปกติปิดเสมอ (NC) ดังรูปที่ 2.32



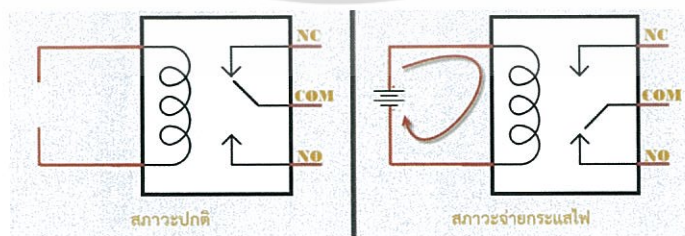
รูปที่ 2.32 (ก) SPST และ (ข) DPST [9]

SPST คือ Single Pole Single Throw

DPST คือ Double Pole Single Throw

SPDT คือ Single Pole Double Throw

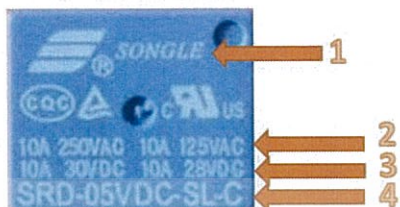
DPDT คือ Double Pole Double Throw



รูปที่ 2.33 สภาวะการทำงานของ Relay [9]

จากส่วนประกอบข้างต้นที่ได้กล่าวไป เราจะใช้งาน Relay แบบ SPDT (Single Pole Double Throw) หลักการทำงานของ Relay นั้น ในส่วนของขดลวด เมื่อมีกระแสไฟฟ้าไหลผ่าน จะทำให้ออกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขดลวดเกิดการเหนี่ยวนำและทำหน้าที่เสมือนแม่เหล็กไฟฟ้า ส่งผลให้ขา COM ที่เชื่อมต่ออยู่กับหน้าสัมผัส NC (ในสถานะที่ยังไม่เกิดการเหนี่ยวนำ) ย้ายกลับเชื่อมต่อกับหน้าสัมผัส NO แทน และปล่อยให้ขา NC ลอย เมื่อมองที่ขา NC กับ COM และ NO กับ COM แล้วจะเห็นว่ามีการทำงานติดต่อกับลักษณะคล้ายการทำงานของสวิตช์ เราสามารถอาศัยคุณสมบัตินี้ไปประยุกต์ใช้งานได้ [9]



รูปที่ 2.34 ลักษณะของ Relay Module [9]

1. ยี่ห้อ รุ่นของผู้ผลิต (แบรนด์) รวมถึงสัญลักษณ์มาตรฐานต่างๆ
2. รายละเอียดของไฟฟ้ากระแสสลับที่รองรับการทำงานได้ (VAC)
3. รายละเอียดของไฟฟ้ากระแสตรงที่รองรับการทำงานได้ (VDC)
4. โมเดล ระดับแรงดันฝั่งขดลวด ชนิดและโครงสร้าง และข้อมูลด้าน Coil Sensitivity

2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.9.1 “Experimental and numerical Investigation on the performance of small-sized cavitating venturis” [12]

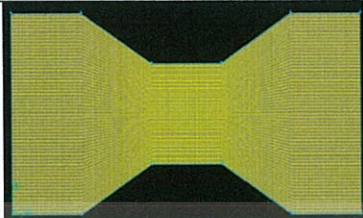



(การทดลองและตรวจสอบเชิงตัวเลข เกี่ยวกับประสิทธิภาพของท่อเวนทิวรีที่มีขนาดเล็ก)

ท่อเวนทิวรีเป็นอุปกรณ์อย่างง่ายที่สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมที่วัดความดันแตกต่างของอัตราการไหลของของเหลว ในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาการทำงานของท่อเวนทิวรีขนาดเล็ก และความสามารถในการควบคุมอัตราการไหลเชิงมวล ซึ่งทดลองและตรวจสอบด้วยค่าเชิงตัวเลข ผลของความดันตอนต้นและตอนปลายของท่อเวนทิวรี รวมทั้งพารามิเตอร์ทางเรขาคณิต เช่น เส้นผ่านศูนย์กลางตรงคอคอด และมุมกระจายในการไหลของมวล และอัตราของความดัน คือจุดสำคัญต่อการศึกษา สำหรับการเก็บข้อมูลการทดลองทั้ง 3 ส่วนของท่อเวนทิวรี 0.7, 1 และ 1.5 มิลลิเมตร ที่ได้สร้างขึ้นมาเพื่อทดสอบ ท่อเวนทิวรีถูกทดสอบความดันแตกต่างที่ต้นและปลายท่อ เพื่อทดสอบการวัดอัตราการไหลออกของท่อ และลักษณะของเส้นโค้ง การไหลในท่อเวนทิวรีถูกจำลองโดยคอมพิวเตอร์ โดยกำหนดให้เป็นของไหลแบบไดนามิก ผลการทดสอบพบว่ามีความเบี่ยงเบนสูงสุดของข้อมูลที่ยอมรับได้ 5-10% และได้รับการยืนยันว่าเป็นวิธีการเชิงตัวเลขที่สามารถนำมาใช้ในการวิเคราะห์อัตราส่วนความดันที่สำคัญและอัตราการไหลของมวลสารของท่อขนาดเล็กได้ นอกจากนี้ยังพบว่าแม้มีขนาดเล็กของท่อเวนทิวรียังสามารถควบคุมอัตราการไหลของมวลถือว่าเป็นลักษณะที่เป็นปกติ โดยการลดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางคอคอดของโพรงทำให้ขนาดนั้นจำกัดมากขึ้น ผลการทดลองยังแสดงให้เห็นว่าการเพิ่มมุมการกระจายและความยาวของคอคอด ส่งผลให้อัตราส่วนของความดันลดลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.9.2 “Cfd Simulation on Different Geometries of Venturimeter” [14]

ตารางที่ 2.4 ตารางผลการทดลองของงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ลักษณะของการออกแบบท่อเวนทูรี	ผลการทดลอง		
 แบบที่ 1	Parameters	Min	Max
	Pressure(Pa)	-53977.21	5552.164
	Velocity(m/s)	0	9.4006
	Turbulent(m ² s ²)	0.2347	5.28177
 แบบที่ 2	Parameters	Min	Max
	Pressure(Pa)	-90194.45	13095.87
	Velocity(m/s)	0	9.185
	Turbulent(m ² s ²)	0.2672125	11.630932
 แบบที่ 3	Parameters	Min	Max
	Pressure(Pa)	-51152.82	5681.665
	Velocity(m/s)	0	9.38077
	Turbulent(m ² s ²)	0.1972782	4.908975
 แบบที่ 4	Parameters	Min	Max
	Pressure(Pa)	-19414.05	7617.83
	Velocity(m/s)	0	6.73726
	Turbulent(m ² s ²)	0.1887413	2.143962

จากการที่เราได้ศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องในการออกแบบท่อเวนทูรี เราจึงเลือกลักษณะของท่อเวนทูรีในแบบที่ 3 เนื่องจากผลการทดลองมีค่าผลต่างของความดันและความเร็วสูง และมีค่าความปั่นป่วนของก๊าซหรือของเหลวภายในท่อ (Turbulent) ต่ำ จึงทำให้อุปกรณ์ตรวจจับความดันตรวจจับสามารถตรวจจับได้ง่าย และลักษณะของท่อเวนทูรี มีโครงสร้างในการออกแบบที่สะดวกและง่ายต่อการนำไปขึ้นชิ้นงาน

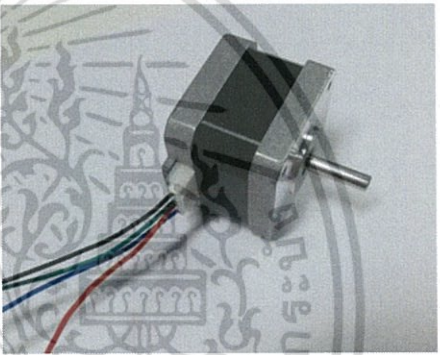

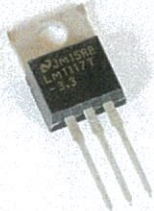
บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานวิจัย

ในงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการควบคุมความดันสำหรับการวัดอัตราการไหล ที่เกิดจากผลต่างของความดัน โดยการออกแบบโครงสร้างของเครื่องมือวัด นอกจากนี้ยังศึกษาถึงปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อการทำงานของเครื่องมือวัดที่ออกแบบ

3.1 วัสดุและอุปกรณ์

ตารางที่ 3.1 วัสดุและอุปกรณ์ที่เกี่ยวข้อง

ชื่อวัสดุและอุปกรณ์	ภาพประกอบ
1. Stepper Motor (42HB34F08AB)	
2. A4988 Stepper Driver Module	
3. Regulator (LM1117)	

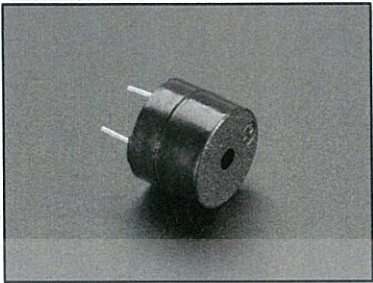


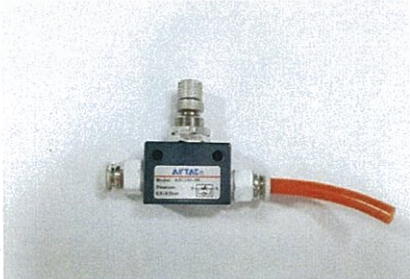
รูปที่ 3.1 Stepper Motor (42HB34F08AB)

รูปที่ 3.2 Driver Motor (A4988) [18]

รูปที่ 3.3 Regulator (LM1117) [17]




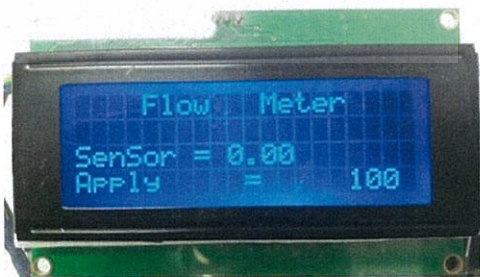
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.1 (ต่อ) วัสดุและอุปกรณ์ที่เกี่ยวข้อง

ชื่อวัสดุและอุปกรณ์	ภาพประกอบ
4. Buzzer 5V	 <p data-bbox="893 635 1129 679">รูปที่ 3.4 Buzzer 5V</p>
5. Relay Module 12V	 <p data-bbox="824 984 1205 1028">รูปที่ 3.5 Relay Module 12V [9]</p>
6. ชุด Arduino UNO R3	 <p data-bbox="806 1443 1227 1487">รูปที่ 3.6 ชุด Arduino UNO R3 [10]</p>
7. วาล์วควบคุม (Control Valves)	 <p data-bbox="787 1836 1256 1880">รูปที่ 3.7 วาล์วควบคุม (Control Valves)</p>




เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.1 (ต่อ) วัสดุและอุปกรณ์ที่เกี่ยวข้อง

ชื่อวัสดุและอุปกรณ์	ภาพประกอบ
8. เซ็นเซอร์วัดความดันแตกต่าง (Differential Pressure Sensors: SPD 611, ช่วง ± 500 Pa)	 <p>รูปที่ 3.8 Differential Pressure Sensors [15]</p>
9. ตัวแปลงไฟ 12V	 <p>รูปที่ 3.9 ตัวแปลงไฟ 12V</p>
10. คีย์แพด	 <p>รูปที่ 3.10 คีย์แพด</p>
11. จอแสดงผล (LCD)	 <p>รูปที่ 3.11 จอแสดงผล (LCD)</p>

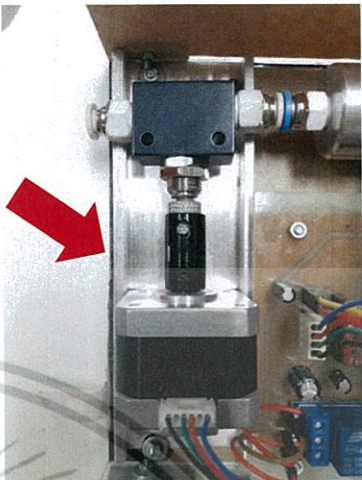
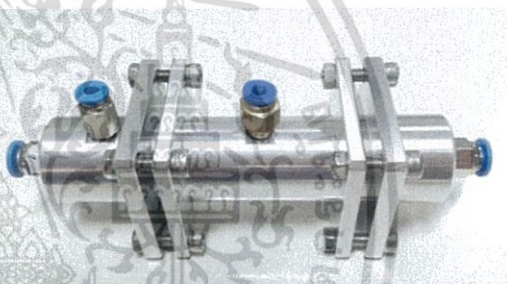


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.1 (ต่อ) วัสดุและอุปกรณ์ที่เกี่ยวข้อง

ชื่อวัสดุและอุปกรณ์	ภาพประกอบ
12. โรตاميเตอร์	 <p data-bbox="885 825 1142 869">รูปที่ 3.12 โรตاميเตอร์</p>
13. ก๊าซไนโตรเจน	 <p data-bbox="875 1399 1161 1437">รูปที่ 3.13 ก๊าซไนโตรเจน</p>
14. Aluminum Alloy Coupling for Motor ขนาด 5 mm x 8 mm L25 mm	 <p data-bbox="792 1830 1253 1917">รูปที่ 3.14 Aluminum Alloy Coupling for Motor</p>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.1 (ต่อ) วัสดุและอุปกรณ์ที่เกี่ยวข้อง

ชื่อวัสดุและอุปกรณ์	ภาพประกอบ
15. ราง CNC	 <p data-bbox="800 808 1230 851">รูปที่ 3.15 ราง CNC ที่ประกอบขึ้นเอง</p>
16. ท่อเวนทูรี	 <p data-bbox="808 1168 1223 1212">รูปที่ 3.16 ท่อเวนทูรี ที่ออกแบบเอง</p>
17. พัดลมระบายอากาศ 12V	 <p data-bbox="808 1506 1223 1550">รูปที่ 3.17 พัดลมระบายอากาศ 12V</p>
18. แผ่นอะคริลิกแบบสีใสและสีดำ	 <p data-bbox="786 1889 1259 1932">รูปที่ 3.18 แผ่นอะคริลิกแบบสีใสและสีดำ</p>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.1 (ต่อ) วัสดุและอุปกรณ์ที่เกี่ยวข้อง

ชื่อวัสดุและอุปกรณ์	ภาพประกอบ
19. น้ำยาเชื่อมประสานอะคริลิก	 <p data-bbox="786 797 1237 840">รูปที่ 3.19 น้ำยาเชื่อมประสานอะคริลิก</p>
20. กาวซิลิโคน	 <p data-bbox="888 1201 1135 1244">รูปที่ 3.20 กาวซิลิโคน</p>
21. แผ่นปรีนทองแดง	 <p data-bbox="859 1638 1179 1681">รูปที่ 3.21 แผ่นปรีนทองแดง</p>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.1 (ต่อ) วัสดุและอุปกรณ์ที่เกี่ยวข้อง

ชื่อวัสดุและอุปกรณ์	ภาพประกอบ
22. สายไฟสำหรับบอร์ดอาดูโน่	 <p data-bbox="802 685 1228 729">รูปที่ 3.22 สายไฟสำหรับบอร์ดอาดูโน่</p>
23. สายไฟเล็ก	 <p data-bbox="893 1131 1137 1172">รูปที่ 3.23 สายไฟเล็ก</p>
<p data-bbox="198 1185 690 1273">24. อุปกรณ์ใช้สำหรับการประกอบแผงวงจรควบคุม</p> <ul style="list-style-type: none"> <li data-bbox="248 1284 369 1316">— หัวแร้ง <li data-bbox="248 1327 355 1360">— ตะกั่ว <li data-bbox="248 1371 457 1404">— น้ำยาประสาน <li data-bbox="248 1415 413 1447">— ที่ดูดตะกั่ว <li data-bbox="248 1458 471 1491">— มิเตอร์วัดโวลต์ 	 <p data-bbox="787 1886 1257 1972">รูปที่ 3.24 อุปกรณ์ใช้สำหรับการประกอบแผงวงจรควบคุม</p>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2 วิธีการดำเนินงาน

3.2.1 เครื่องมือวัดชุดทดลองท่อเวนทური

การดำเนินงานวิจัยเริ่มศึกษาทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับเครื่องมือวัดและการออกแบบเครื่องมือวัดอัตราการไหลของก๊าซท่อเวนทური โดยใช้โปรแกรม SolidWorks 2012

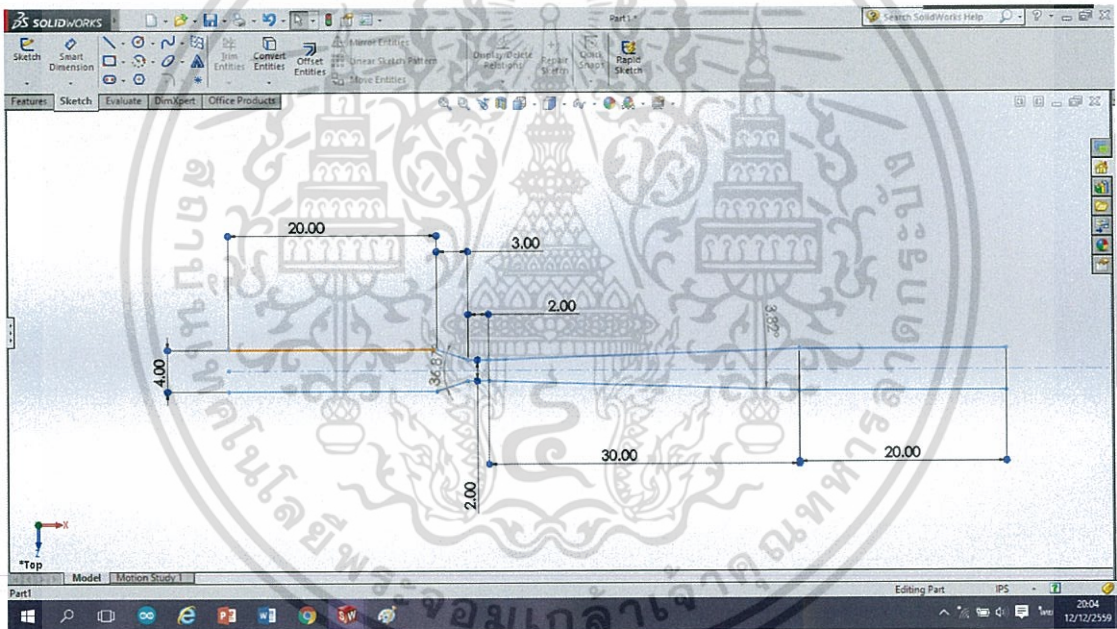
3.2.1.1 ศึกษาการออกแบบท่อเวนทურიเพื่อใช้เป็นตัววัดอัตราการไหลของก๊าซไนโตรเจน

สำหรับการทดลองในการดำเนินงานวิจัย จึงได้ทำการออกแบบท่อเป็น 3 ส่วน ดังนี้

ส่วนที่ 1 (Converging cone): เราก่อการออกแบบเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 4 mm เนื่องจากให้เข้ากับท่อลมในห้องปฏิบัติการ ส่วนนี้มีความดันและความเร็ว ค่าหนึ่ง

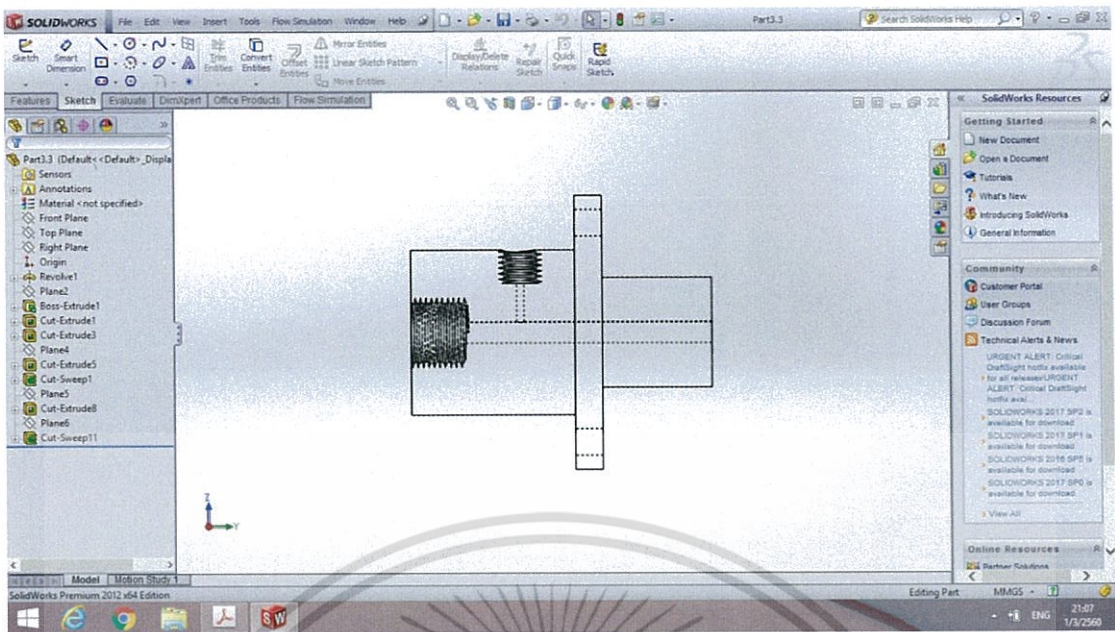
ส่วนที่ 2 (Throat): ส่วนนี้เป็นส่วนที่เกิดจากการเร่งความเร็วของก๊าซทำให้ความดันลดลง เนื่องจากพื้นที่หน้าตัด (A) ลดลง ดังนั้นส่วนนี้ คือ ส่วนที่เกิดผลต่างความดัน

ส่วนที่ 3 (Diverging cone): ส่วนนี้เป็นส่วนที่มีการเพิ่มพื้นที่หน้าตัด ทำให้มีการเพิ่มความดันลดลง ลดความเร็วให้เท่ากับส่วนขาเข้า (Inlet) เพื่อลดการสูญเสียของความดัน

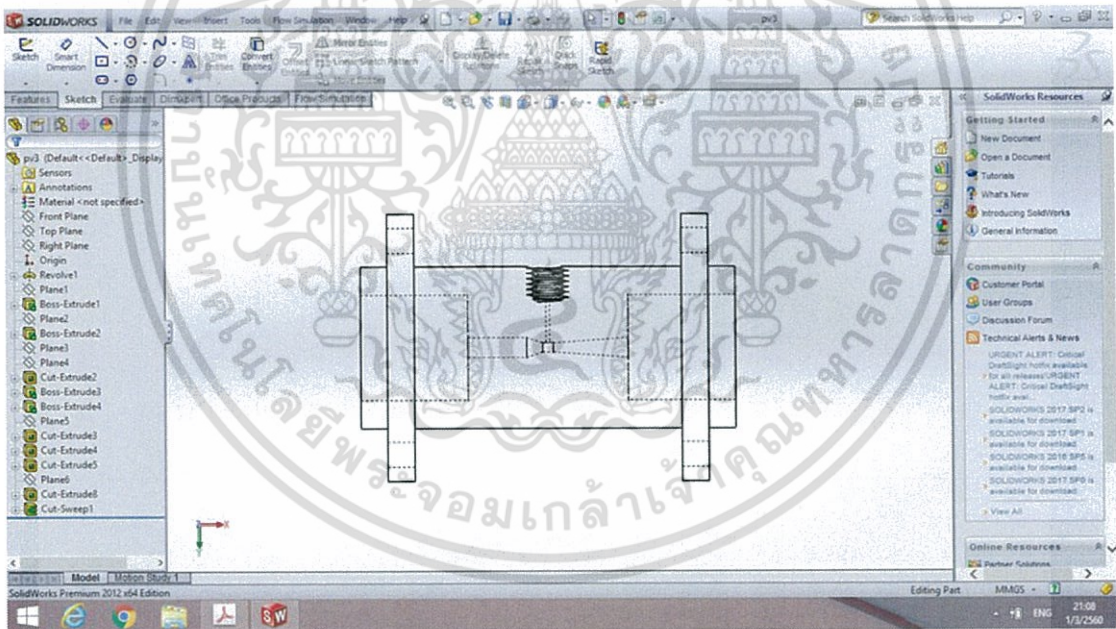


รูปที่ 3.25 Layout การออกแบบท่อเวนทური

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

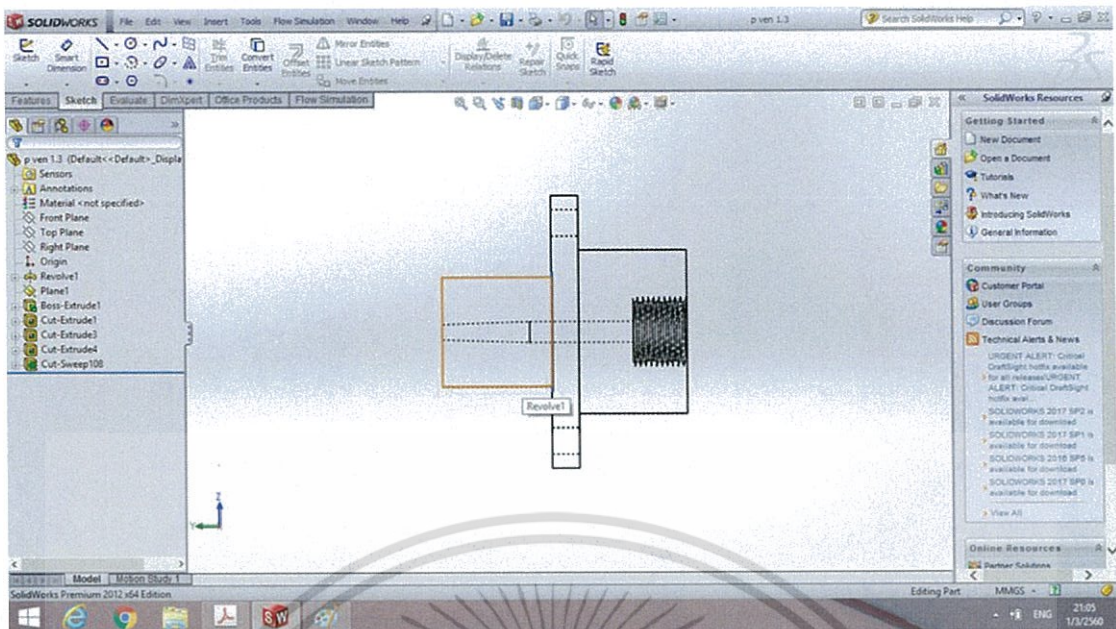


รูปที่ 3.26 การออกแบบท่อเวนทูลี ส่วนที่ 1

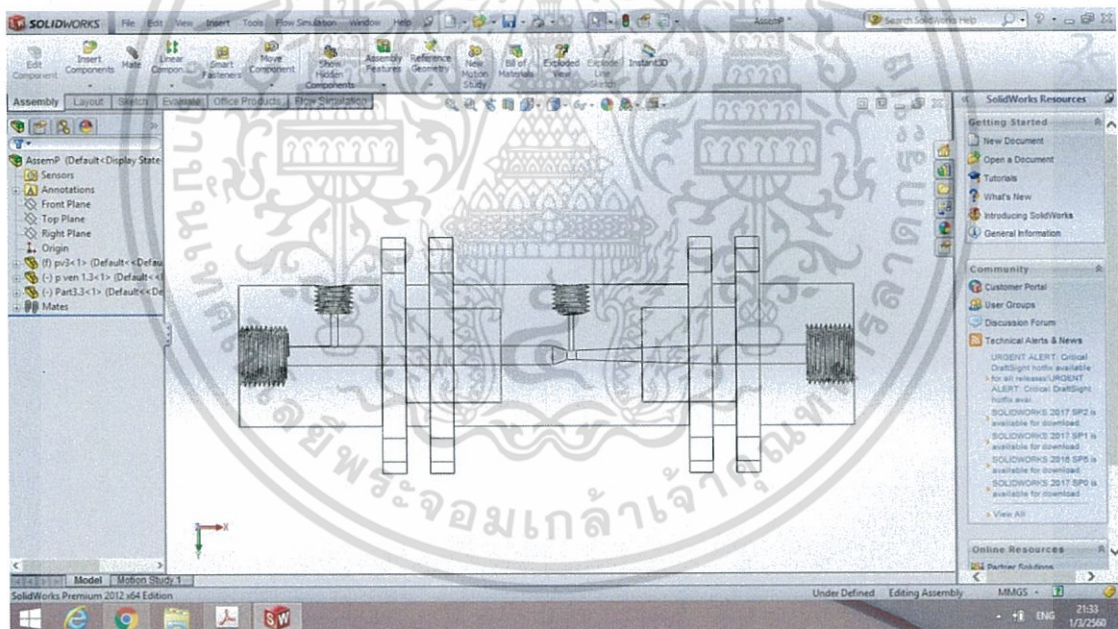


รูปที่ 3.27 การออกแบบท่อเวนทูลี ส่วนที่ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.28 การออกแบบท่อเวนทอรี ส่วนที่ 3



รูปที่ 3.29 การออกแบบท่อเวนทอรี นำทั้ง 3 ส่วนมาประกอบกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.1.2 นำเครื่องมือท่อเวนทอรีที่ออกแบบในโปรแกรมโซลิดเวิร์ค (SolidWorks) ไปวิเคราะห์ระหว่างผลต่างของความดัน (ΔP) กับ อัตราการไหลของก๊าซ (Q) โดยใช้ฟังก์ชันการวิเคราะห์อัตราการไหลในท่อ (Flow Simulation) ดังรูปที่ 3.30 โดยมีพื้นฐานสมการแบร์นูลลี ดังสมการ

$$Q = Av_1C_d$$

$$Q = AC_d \left\{ \frac{2(P_2 - P_1)}{\rho \left(\left(\frac{A}{a} \right)^2 - 1 \right)} \right\}^{\frac{1}{2}}$$

โดยที่ Q = อัตราการไหลของก๊าซ หน่วย mL/min

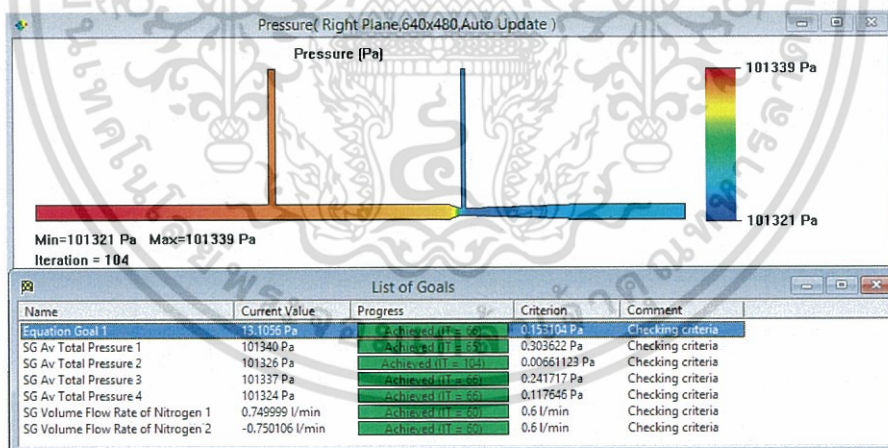
ρ = ความหนาแน่นของก๊าซในโตรเจน เท่ากับ 1.251 kg/m^3

ΔP = ผลต่างของความดัน หน่วย Pa

A = พื้นที่หน้าตัดของท่อเวนทอรี หน่วย m^2

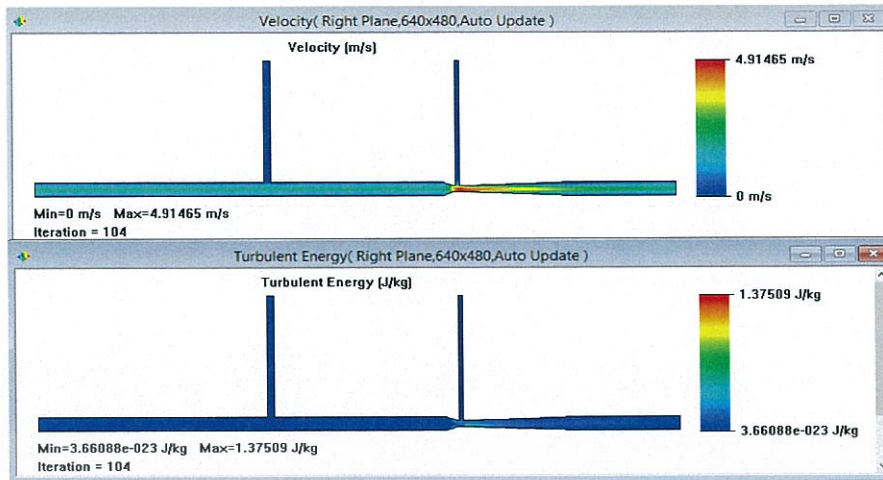
v_1 = ความเร็วเริ่มต้น หน่วย m/s

C_d = ค่าสัมประสิทธิ์การปลดปล่อย $C_d \approx 0.98$



รูปที่ 3.30 ตัวอย่างการวิเคราะห์ระหว่างค่าผลต่างของความดัน, ΔP กับ อัตราการไหลของก๊าซ, Q โดยใช้ฟังก์ชันการวิเคราะห์อัตราการไหลในท่อ (Flow Simulation) บนโปรแกรมโซลิดเวิร์ค (SolidWorks)

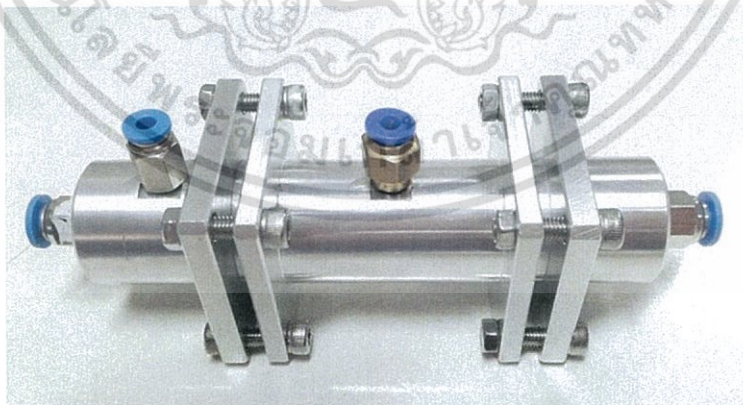
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.31 ตัวอย่างการวิเคราะห์ระหว่างค่าผลต่างของความดัน, ΔP กับ อัตราการไหลของก๊าซ, Q โดยใช้ฟังก์ชันการวิเคราะห์อัตราการไหลในท่อ (Flow Simulation) บนโปรแกรมโซลิดเวิร์ค (SolidWorks)

ซึ่งการวิเคราะห์อัตราการไหลในท่อ (Flow Simulation) บนโปรแกรมโซลิดเวิร์ค (SolidWorks) เพื่อหาค่าผลต่างของความดัน (ΔP) นั้น เราได้ทำการวิเคราะห์อัตราการไหลในท่อ (Flow Simulation) ทั้งหมด 3 ค่า แล้วหาค่าผลต่างของความดันเฉลี่ย แล้วนำค่าอัตราการไหลของก๊าซไนโตรเจน, Q ที่คำนวณเรียบร้อยแล้ว พลอตกราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลของก๊าซไนโตรเจน, Q (mL/min) กับ ผลต่างของความดัน, ΔP (Pa) เพื่อนำมาประยุกต์ใช้เป็นสมการของเครื่องมือวัดที่ออกแบบ

3.2.1.3 ท่อเวนทูรีที่กลึงเรียบร้อย (เครื่องมือวัดที่ออกแบบ)



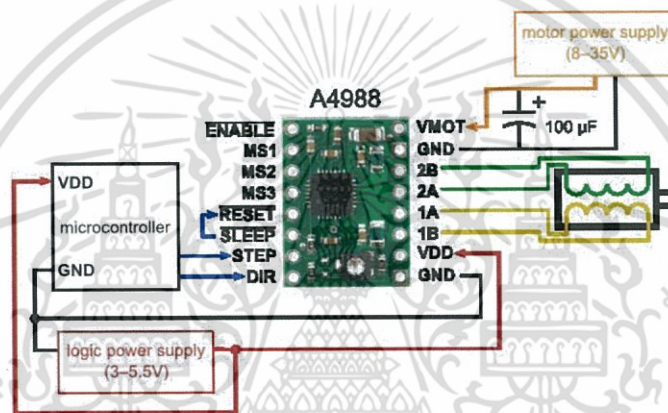
รูปที่ 3.32 ลักษณะท่อเวนทูรีเครื่องมือวัดจริง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.2 วงจรการควบคุมการทำงาน

การดำเนินงานวิจัยเริ่มการออกแบบในส่วนของชุดควบคุมอัตราการไหลของก๊าซไนโตรเจน ก่อนเข้าระบบท่อเวนทูรี โดยการเขียนชุดคำสั่งม็อดประกอบต่างๆ ดังนี้

3.2.2.1 การดำเนินงานวิจัยนี้เราได้นำ ตัว A4988 Stepper Driver Module มาประกอบในวงจรส่วนควบคุมการทำงาน ดังรูปที่ 3.33 ไดอะแกรมในการออกแบบวงจรควบคุมการทำงานเพื่อขับเคลื่อนการหมุนของสเต็ปเปอร์มอเตอร์ (Stepper Motor) เหตุผลที่เราเลือก A4988 Stepper Driver นี้มาใช้เพราะสามารถปรับความละเอียด Step สูงสุดได้ถึง 1/16 Step หรือ 0.1125° per step จึงทำให้สเต็ปเปอร์มอเตอร์มีความละเอียดในการหมุนมากยิ่งขึ้น ซึ่ง ตัว A4988 Stepper Driver (with Heat sink) ยังรองรับกระแสสูงสุด 2 A และสามารถใช้ร่วมกับ CNC Shield V3 Engraving Machine A4988 Driver Board (EFDV557) สำหรับสร้าง CNC, 3D Printer หรือ laser cutters



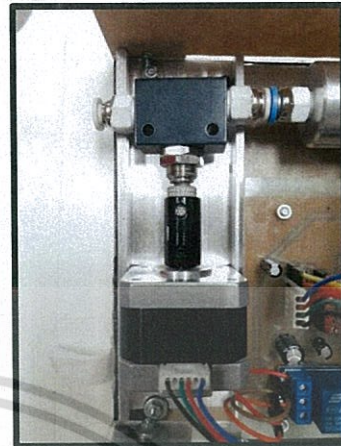
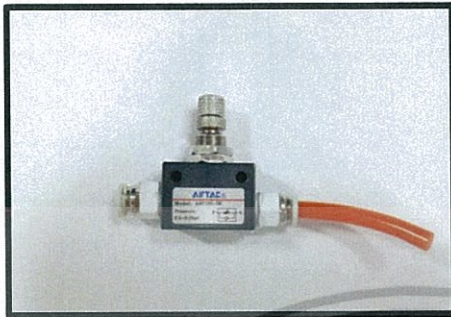
รูปที่ 3.33 ไดอะแกรม สำหรับการเชื่อมต่อไมโครคอนโทรลเลอร์ไปยัง A4988 Stepper Driver Module เพื่อขับสเต็ปเปอร์มอเตอร์ (Full-step mode) [13]

3.2.2.2 การดำเนินงานวิจัยนี้เราได้นำ ตัว สเต็ปเปอร์มอเตอร์ (Stepper Motor) มาเป็นตัวควบคุมการทำงานของวาล์วควบคุม (Control Valves) ดังรูปที่ 3.34 (ข) สำหรับกำหนดค่าอัตราการไหลของก๊าซไนโตรเจน สเต็ปเปอร์มอเตอร์ (Stepper Motor) สามารถขับเคลื่อนโดยแหล่งจ่ายไฟกระแสตรง (DC) และโปรแกรม Arduino ได้ถูกนำมาควบคุมอัตราการไหลของก๊าซไนโตรเจน ซึ่งสเต็ปเปอร์มอเตอร์ (Stepper Motor) จะถูกควบคุมด้วยชุดคำสั่งจากโปรแกรม Arduino เหตุผลที่เราเลือก สเต็ปเปอร์มอเตอร์ (Stepper motor) นี้ เพราะ สามารถใช้ในงานควบคุมตำแหน่งในลักษณะวงจรควบคุมแบบเปิดได้ โดยไม่ต้องการสัญญาณป้อนกลับ (Feedback signal) แต่อาศัยการนับจำนวน pulse ที่ส่งไปควบคุมการหมุนแทน จึงทำให้ความแม่นยำในเรื่องของตำแหน่ง ซึ่ง สเต็ปเปอร์มอเตอร์ (Stepper motor) นี้มีความละเอียดในการหมุน 1.8° per step

3.2.2.3 การดำเนินงานวิจัยได้ศึกษาทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับรูปแบบของวาล์วควบคุมอัตราการไหลของก๊าซ ที่เราต้องการ ควบคุมอัตราการไหลของก๊าซไนโตรเจน เข้ายัง ด้าน ขาเข้า (Inlet) ของชุดท่อเวนทูรี โดยเราได้นำ แมคคาณิกส์วาล์ว (Mechanics Valves) ชนิด วาล์วควบคุม (Control Valves) ขนาดที่ต้องการมาใช้ในการทำงานร่วมกับเครื่องมือวัดที่ออกแบบ มีการทำงานโดยถูก สเต็ปเปอร์มอเตอร์ (Stepper Motor) ควบคุมแทนการหมุนด้วยมือ ดังรูปที่ 3.34

เอกสารนี้เป็นทรัพย์สินทางปัญญาของภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี หากมีการนำเอกสารนี้ไปใช้โดยไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

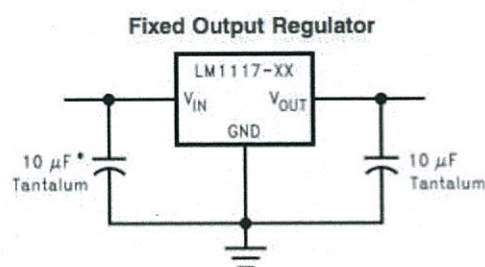
เหตุผลที่เราเลือก วาล์วควบคุม (Control Valves) นี้ เพราะวาล์วควบคุม (Control Valves) มีความละเอียดในการวัดอัตราการไหลของก๊าซและสามารถทนความดันได้สูงถึง 9 bar



รูปที่ 3.34 (ก) วาล์วควบคุม (Control Valves) (ข) วาล์วเชื่อมต่อกับ Stepper Motor

3.2.2.4 การดำเนินงานวิจัยได้ศึกษาทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการตัวตรวจจับการวัดอัตราการไหลของก๊าซ โดยนำเซ็นเซอร์ตรวจจับผลต่างของความดัน (Differential Pressure Sensors : SDP 611) ที่มีค่าการตรวจวัดผลต่างของความดันอยู่ในช่วงที่ต้องการ โดยระหว่างการทดสอบเครื่องมือวัดที่ออกแบบ ณ ศูนย์เทคโนโลยีไมโครอิเล็กทรอนิกส์ เราทำการศึกษา Data Sheet ของตัวเซ็นเซอร์ตรวจจับผลต่างของความดัน (Differential Pressure Sensors : SDP 611) เหตุผลที่เราเลือก ตัวเซ็นเซอร์ตรวจจับผลต่างของความดัน นี้มาใช้เพื่อวัดอัตราการไหลของก๊าซไนโตรเจนและคำนวณหาการวัดอัตราการไหลของก๊าซไนโตรเจน เพราะมีช่วงตรวจจับผลต่างของความดัน ± 500 Pa ซึ่งเพียงพอในการวัดผลต่างของความดัน และตัวเซ็นเซอร์นี้ให้สัญญาณที่ออกมา (Output) เป็นเชิงเส้นได้แม่นยำ

3.2.2.5 การดำเนินงานวิจัยได้ศึกษา Data Sheet ของตัวเรกูเรเตอร์ (Regulator : LM1117 3.3V) เหตุผลที่เราเลือกตัวเรกูเรเตอร์นี้ มาประกอบในวงจรส่วนควบคุมการทำงานที่ควบคุมอัตราการไหลของก๊าซไนโตรเจน เพราะ นำ ตัวเรกูเรเตอร์ (Regulator LM1117 3.3V) มาจ่ายแรงดันไฟฟ้า 3.3V ให้กับตัวเซ็นเซอร์ตรวจจับผลต่างของความดัน (Differential Pressure Sensors : SPD 611) ดังรูปที่ 3.35

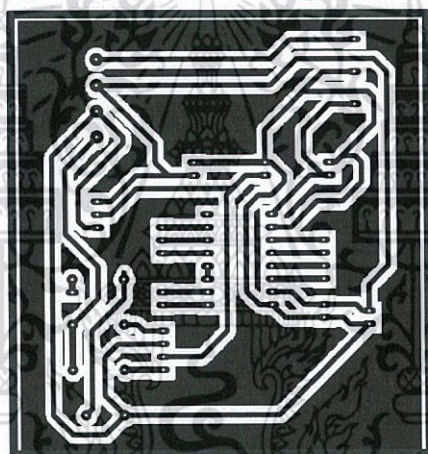


รูปที่ 3.35 Schematic การต่อวงจร IC LM1117 Voltage Regulator 3.3V [16]

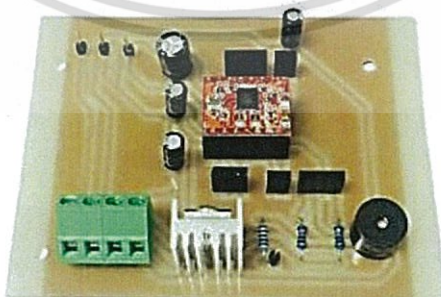
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.2.6 การดำเนินงานวิจัยได้ทำการออกแบบวงจรควบคุมการทำงานที่ควบคุมอัตราการไหลของก๊าซไนโตรเจนของเครื่องมือวัดที่ออกแบบ โดยการเขียนเป็น Schematic นำตัว A4988 Stepper Driver มาประกอบบนวงจรส่วนควบคุมการทำงานที่ควบคุมอัตราการไหลของก๊าซไนโตรเจน บนโปรแกรม PCB Wizard ซึ่งเป็นวงจรในการขับเคลื่อนการหมุนของ สเต็ปเปอร์มอเตอร์ (Stepper Motor) ดังรูปที่ 3.36 และแผงวงจรที่ออกแบบมาปรี้นลงกระดาษโฟโต้ตามขนาด ที่เราออกแบบ แล้วนำมาติดลงบนแผ่นปรี้นทองแดง โดยใช้ น้ำยากัดลายปรี้นเพื่อให้เห็นลายวงจรที่ชัดเจน หลังจากนั้นก็เชื่อมต่อวัสดุและอุปกรณ์ โดยการบัดกรี จนเสร็จเรียบร้อย ดังรูปที่ 3.37

3.2.2.7 การดำเนินงานวิจัย เราได้ศึกษาการทำงานของอาตุโน ซึ่งเป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ ที่มีลักษณะเป็นบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ เราจึงได้นำ บอร์ด Arduino ชนิด UNO R3 มาประกอบในส่วนของการควบคุมการทำงานที่ควบคุมอัตราการไหลของก๊าซไนโตรเจน โดยงานวิจัยของเรานั้น ได้ศึกษา Library ของ บอร์ด Arduino UNO R3 แล้วทำการเขียนโปรแกรมเพื่อควบคุมการทำงานที่ควบคุมอัตราการไหลของก๊าซไนโตรเจนและสำหรับการอ่านค่าผลต่างของความดันจาก ตัวเซ็นเซอร์ตรวจจับผลต่างของความดัน (Differential Pressure Sensor)



รูปที่ 3.36 PCB Layout ของวงจร

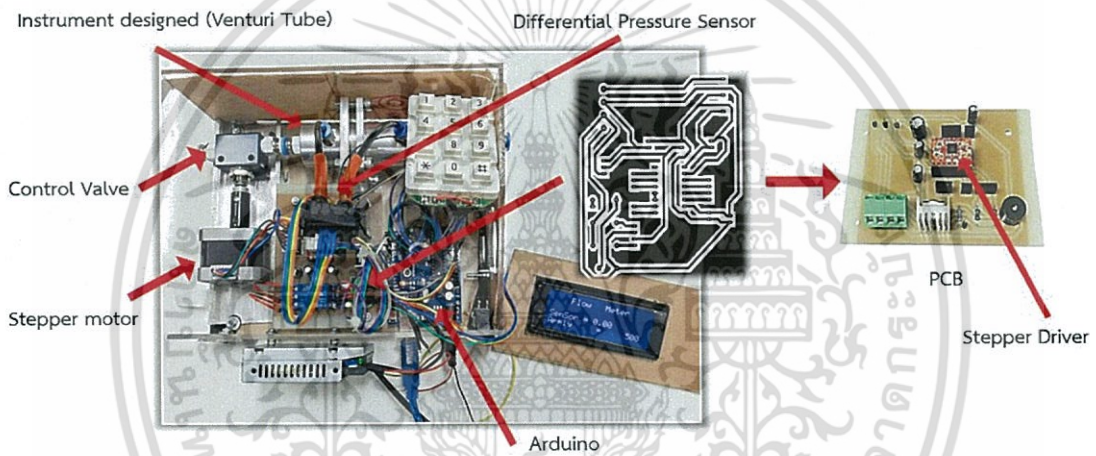


รูปที่ 3.37 บอร์ดวงจรควบคุมระบบการทำงานของเครื่องขับเคลื่อนสเต็ปเปอร์มอเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.3 เครื่องมือวัดที่ติดตั้งเรียบร้อย

การดำเนินงานวิจัยนี้ นำวัสดุและอุปกรณ์ มาเชื่อมต่อกัน และประกอบกล่องอะคริลิก สำหรับในเครื่องมือวัดในระบบทั้งหมด ให้เรียบร้อย โดยที่ฝากล่องด้านบนจะติดตั้งคีย์แพด ที่เลือกใช้ คีย์แพดแบบปุ่มกดเนื่องจากทำให้เรากดค่าได้อย่างชัดเจนและมีเสียงปุ่มกดจาก การเชื่อมต่อ Buzzer 5V ลงไปในวงจร และแสดงผลไปยังจอแสดงผล (LCD) สำหรับการป้อนค่าควบคุมการทำงานของ เครื่องวัดที่ออกแบบ ตามที่เราต้องการ โดยที่จอแสดงผล (LCD) จะแสดงค่า อัตราการไหลของก๊าซ ไนโตรเจนที่เราป้อนค่าเข้าไป และผลต่างของความดันจากเซ็นเซอร์ตรวจจับผลต่างของความดัน (Differential Pressure Sensors : SDP 611) ที่วัดได้จากเครื่องมือวัดที่ออกแบบ และด้านข้างกล่อง จะติดตั้งพัดลม และ ติดตั้งตัวแปลงไฟ 12V ไว้ด้านข้างกล่องเพื่อสะดวกต่อการทดสอบงาน และมี สวิตซ์ เปิด-ปิด พัดลมระบายอากาศเพื่อตัวช่วยในการระบายความร้อนจากการทำงานภายใน เครื่องมือวัดที่ออกแบบ ดังที่รูปที่ 3.38 และ รูปที่ 3.39



รูปที่ 3.38 ลักษณะภายในวัสดุและอุปกรณ์ของเครื่องมือวัดที่ออกแบบ



รูปที่ 3.39 เครื่องมือวัดที่ออกแบบแล้วประกอบเสร็จเรียบร้อย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น-อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

ผลการวิจัยและการอภิปรายผล

ในการทดลองทั้งหมดนี้มีจุดประสงค์เพื่อวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลของก๊าซไนโตรเจนกับผลต่างของความดันของเครื่องมือวัดที่ออกแบบ ซึ่งจะมีการวิเคราะห์จากการทฤษฎีของแบร์นูลลี, การวิเคราะห์ผลจากการทดสอบในโปรแกรมโซลิดเวิร์ค (SolidWorks) โดยใช้ฟังก์ชันการวิเคราะห์อัตราการไหลของก๊าซในท่อที่ออกแบบ (Flow Simulation), การวิเคราะห์ผลจากการทดสอบในทางปฏิบัติโดยใช้เครื่องมือวัดอัตราการไหล (Flow rate model 0550E) หลังจากนั้นนำเครื่องมือวัดที่ออกแบบที่ผ่านการสอบเทียบจากการวิเคราะห์ผลการทดสอบข้างต้นที่กล่าวมาใช้งานจริง เพื่อหาอัตราการไหลของก๊าซไนโตรเจนเข้าสู่เตาเผาในห้องปฏิบัติการ

4.1 การทดลองความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลของก๊าซกับผลต่างของความดัน

4.1.1 ตอนที่ 1 การวิเคราะห์จากสมการทฤษฎีของแบร์นูลลี เพื่อคำนวณหาผลต่างความดัน

ในการทดลองนี้เป็นการคำนวณหาผลต่างของความดัน ตามสมการทฤษฎีแบร์นูลลีโดยที่เรากำหนดช่วงอัตราการไหลของก๊าซไนโตรเจน ที่ 50 mL/min ถึง 800 mL/min เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ของผลต่างความดันที่เปลี่ยนแปลงไปเมื่ออัตราการไหลของก๊าซไนโตรเจนเปลี่ยน จากสมการ

$$Q = Av_c C_d$$

$$Q = AC_d \left(\frac{2 \Delta P}{\rho \left(\left(\frac{A}{a} \right)^2 - 1 \right)} \right)^{1/2}$$

$$\Delta P = \left(\frac{Q}{AC_d} \right)^2 \frac{\rho}{2} \left(\left(\frac{A}{a} \right)^2 - 1 \right)$$

$$\Delta P = \left(\frac{Q}{\pi R^2 C_d} \right)^2 \cdot \frac{1.251}{2} \cdot (15)$$

$$\Delta P = \left(\frac{1}{\pi \left(\frac{A}{2} \right)^2 C_d} \right)^2 Q \cdot \frac{10^{-6}}{60} \cdot \frac{1.251}{2} \cdot (15)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

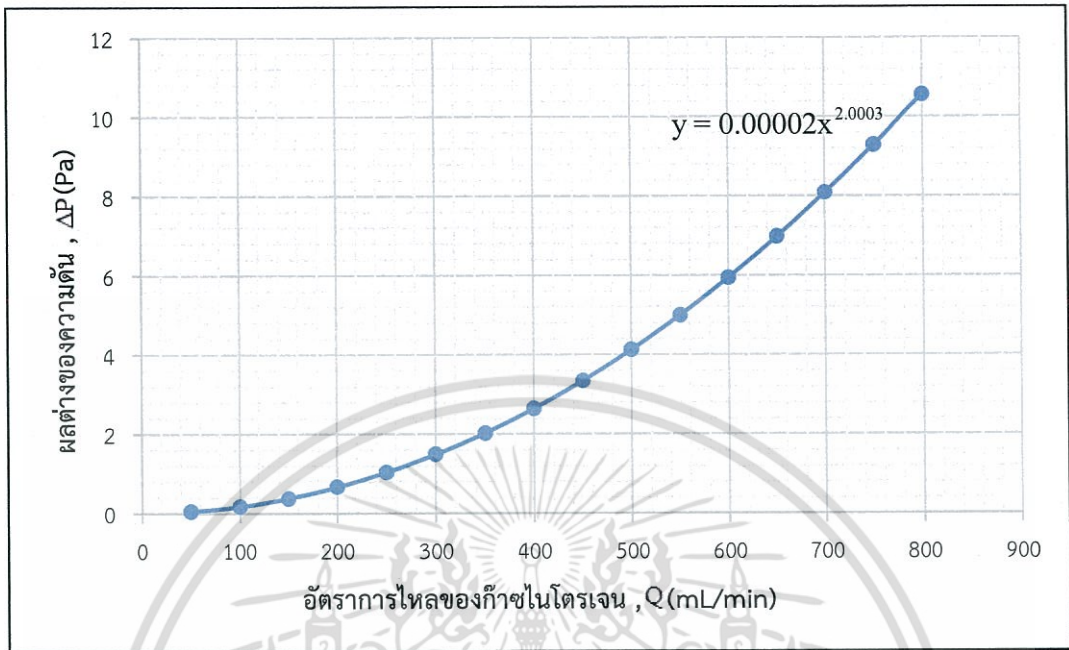
- โดยที่ Q = อัตราการไหลของก๊าซ หน่วย mL/min
 ρ = ความหนาแน่นของก๊าซไนโตรเจน เท่ากับ 1.251 kg/m^3
 ΔP = ผลต่างของความดัน หน่วย Pa
 A = พื้นที่หน้าตัดของท่อเวนทูรี หน่วย m^2
 v_1 = ความเร็วเริ่มต้น หน่วย m/s
 C_d = ค่าสัมประสิทธิ์การปลดปล่อย $C_d \approx 0.98$

ตารางที่ 4.1 การวิเคราะห์จากสมการทฤษฎีของแบร์นูลลี เพื่อคำนวณหาผลต่างของความดัน

ลำดับ	อัตราการไหลของก๊าซไนโตรเจน , Q (mL/min)	ผลต่างของความดัน , ΔP (Pa)
1	50	0.0412
2	100	0.1650
3	150	0.3713
4	200	0.6601
5	250	1.0315
6	300	1.4853
7	350	2.0217
8	400	2.6406
9	450	3.3421
10	500	4.1260
11	550	4.9925
12	600	5.9415
13	650	6.9730
14	700	8.0870
15	750	9.2836
16	800	10.5627

โดยที่ หน่วย mL/min คือ มิลลิลิตรต่อนาที
 หน่วย Pa คือ ปาสคาล

หลังจากนั้นนำค่าที่ได้จากการวิเคราะห์จากสมการทฤษฎีของแบร์นูลลี มาพลอตกราฟ แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลของก๊าซไนโตรเจน, Q กับ ผลต่างของความดัน, ΔP



รูปที่ 4.1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลของก๊าซไนโตรเจน, Q (mL/min) กับ ผลต่างของความดัน, ΔP (Pa) ซึ่งได้จากการวิเคราะห์จากสมการทฤษฎีของแบร์นูลลี เพื่อคำนวณหาผลต่างของความดัน

4.1.2 ตอนที่ 2 การวิเคราะห์ผลจากการทดสอบในโปรแกรมโซลิดเวิร์ค (SolidWorks)

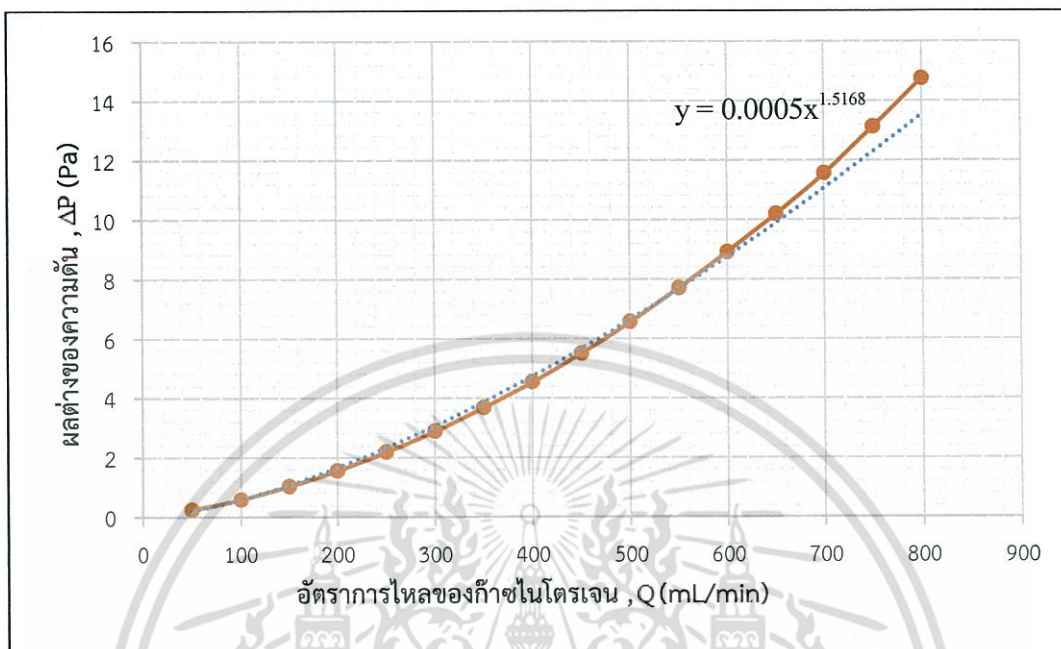
ในการทดลองนี้เป็นการทดสอบท่อเวนทูรีโดยการวิเคราะห์อัตราการไหลในท่อเวนทูรีที่ออกแบบในโปรแกรมโซลิดเวิร์ค (SolidWorks) เพื่อหาผลต่างของความดันที่เกิดขึ้น โดยใช้ฟังก์ชันการวิเคราะห์ของไหลในท่อที่ออกแบบ (Flow Simulation) และเรากำหนดช่วงอัตราการไหลของก๊าซไนโตรเจน ที่ 50 (mL/min) ถึง 800 (mL/min) ให้กับท่อเวนทูรี เพื่อศึกษาผลต่างของความดันที่เปลี่ยนแปลงไปเมื่ออัตราการไหลของก๊าซไนโตรเจนเปลี่ยน โดยทำการทดลอง 3 ครั้ง แล้วนำค่าที่ได้คำนวณหาค่าผลต่างของความดันเฉลี่ย

ตารางที่ 4.2 การวิเคราะห์ผลจากการทดสอบในโปรแกรมโซลิดเวิร์ค (SolidWorks)

ลำดับ	อัตราการไหลของก๊าซไนโตรเจน , Q (mL/min)	ผลต่างของความดัน , ΔP (Pa)			
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย
1	50	0.2314	0.2314	0.2314	0.2314
2	100	0.5770	0.5770	0.5771	0.5770
3	150	1.0229	1.0227	1.0228	1.0228
4	200	1.5528	1.5528	1.5528	1.5528
5	250	2.1708	2.1708	2.1708	2.1708
6	300	2.8755	2.8755	2.8756	2.8757
7	350	3.6712	3.6711	3.6711	3.6711
8	400	4.5285	4.5286	4.5286	4.5285
9	450	5.4932	5.4932	5.4932	5.4932
10	500	6.5467	6.5464	6.5461	6.5464
11	550	7.6953	7.6953	7.6953	7.6953
12	600	8.9039	8.9039	8.9039	8.9039
13	650	10.1744	10.1750	10.1737	10.1744
14	700	11.5376	11.5372	11.5376	11.5375
15	750	13.1055	13.1056	13.1056	13.1056
16	800	14.7388	14.7394	14.7399	14.7394

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หลังจากนั้นนำค่าที่ได้จากการวิเคราะห์จากสมการทฤษฎีของแบร์นูลลี มาพลอตกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลของก๊าซไนโตรเจน, Q (mL/min) กับ ผลต่างของความดัน, ΔP (Pa)



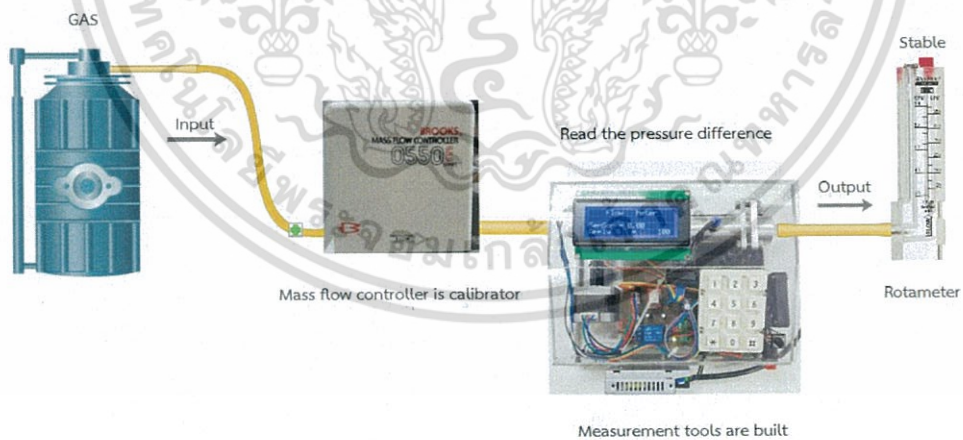
รูปที่ 4.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลของก๊าซไนโตรเจน, Q (mL/min) กับ ผลต่างของความดัน, ΔP (Pa) ซึ่งได้จากการวิเคราะห์ผลการทดลองจากการทดสอบในโปรแกรมโซลิดเวิร์ค (SolidWorks) โดยใช้ฟังก์ชันการวิเคราะห์ของไหลในท่อที่ออกแบบ (Flow Simulation)

4.1.3 ตอนที่ 3 การวิเคราะห์ผลจากการทดสอบในทางปฏิบัติโดยใช้เครื่องมือวัดอัตราการไหล (Flow rate model 0550E)

ในการทดลองนี้เป็นการทดสอบท่อเวนทูรีโดยการทดสอบในทางปฏิบัติโดยใช้เครื่องมือวัดอัตราการไหลของก๊าซ (Flow rate model 0550E) และเรากำหนดช่วงอัตราการไหลของก๊าซ ที่ 50 (mL/min) ถึง 800 (mL/min) เพื่อศึกษาผลต่างของความดันที่เปลี่ยนแปลงไปเมื่ออัตราการไหลของก๊าซเปลี่ยน โดยทำการทดลอง 3 ครั้ง แล้วนำค่าที่ได้คำนวณหาค่าผลต่างของความดันเฉลี่ย



รูปที่ 4.3 ภาพจริงการวิเคราะห์ผลจากการทดสอบในทางปฏิบัติ โดยใช้เครื่องมือวัดอัตราการไหล (Flow rate model 0550E)



รูปที่ 4.4 ภาพไดอะแกรมการวิเคราะห์ผลจากการทดสอบในทางปฏิบัติ โดยใช้เครื่องมือวัดอัตราการไหล (Flow rate model 0550E)

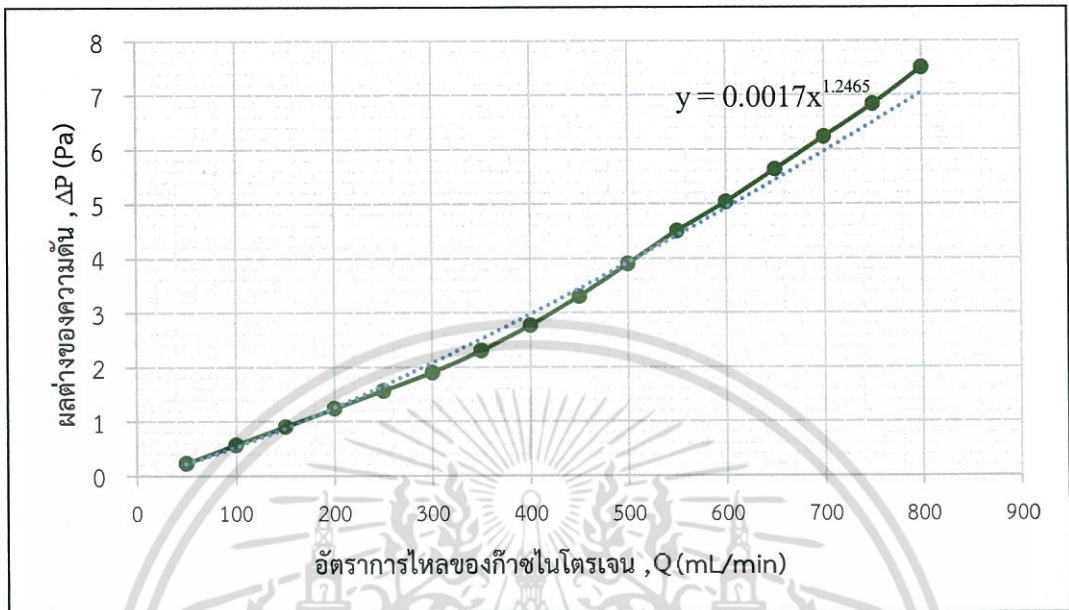
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.3 การวิเคราะห์ผลจากการทดสอบในทางปฏิบัติโดยใช้เครื่องมือวัดอัตราการไหล

ลำดับ	อัตราการไหลของก๊าซ ไนโตรเจน , Q (mL/min)	ผลต่างของความดัน , ΔP (Pa)			
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย
1	50	0.2300	0.2200	0.2300	0.2300
2	100	0.5600	0.5700	0.5700	0.5667
3	150	0.8700	0.9300	0.9000	0.9000
4	200	1.2600	1.2000	1.2400	1.2333
5	250	1.5500	1.5800	1.5700	1.5667
6	300	1.9300	1.9700	2.0000	1.9667
7	350	2.2000	2.4000	2.3000	2.3000
8	400	2.9001	2.6333	2.7667	2.7667
9	450	3.3000	2.9700	3.7000	3.3000
10	500	3.9300	3.9000	3.8700	3.9000
11	550	4.5600	4.4700	4.4700	4.5000
12	600	5.1000	4.9000	5.3000	5.1000
13	650	5.7800	5.6700	5.6500	5.7000
14	700	6.2300	6.4300	6.2400	6.3000
15	750	6.8800	6.9000	6.9200	6.9000
16	800	7.6000	7.5800	7.3200	7.5000

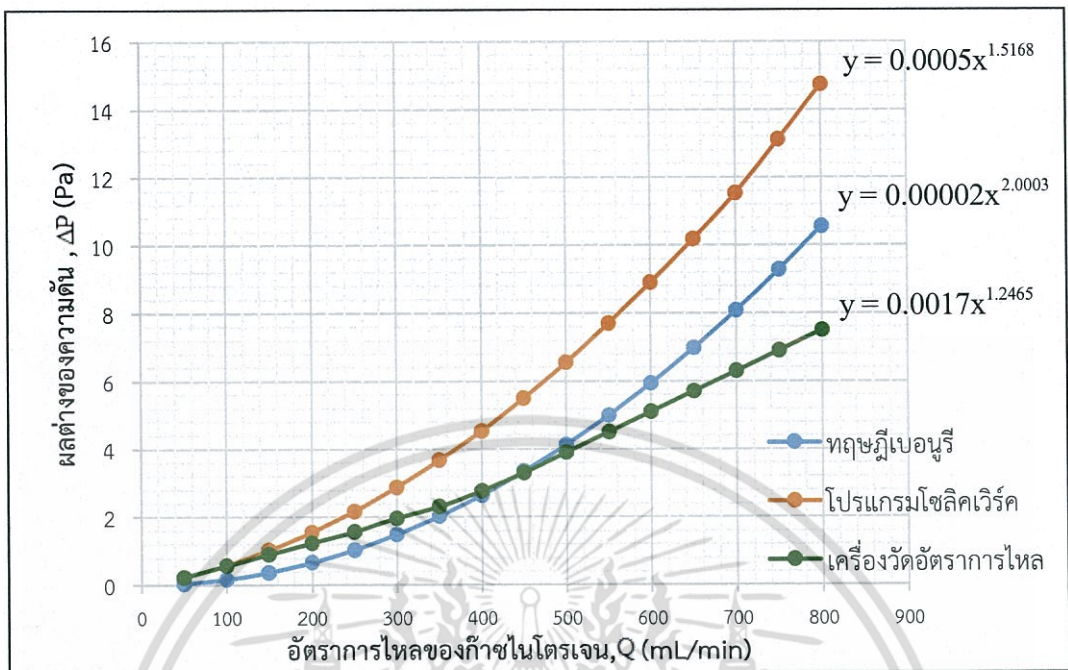
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หลังจากนั้นนำค่าที่ได้จากการวิเคราะห์จากสมการทฤษฎีของแบร์นูลลี มาพลอตกราฟ แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลของก๊าซไนโตรเจน, Q (mL/min) กับ ผลต่างของความดัน, ΔP (Pa)



รูปที่ 4.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลของก๊าซไนโตรเจน, Q (mL/min) กับ ผลต่างของความดัน, ΔP (Pa) ซึ่งได้จากการวิเคราะห์ผลจากการทดสอบในทางปฏิบัติ โดยใช้เครื่องมือวัดอัตราการไหล (Flow rate model 0550E)

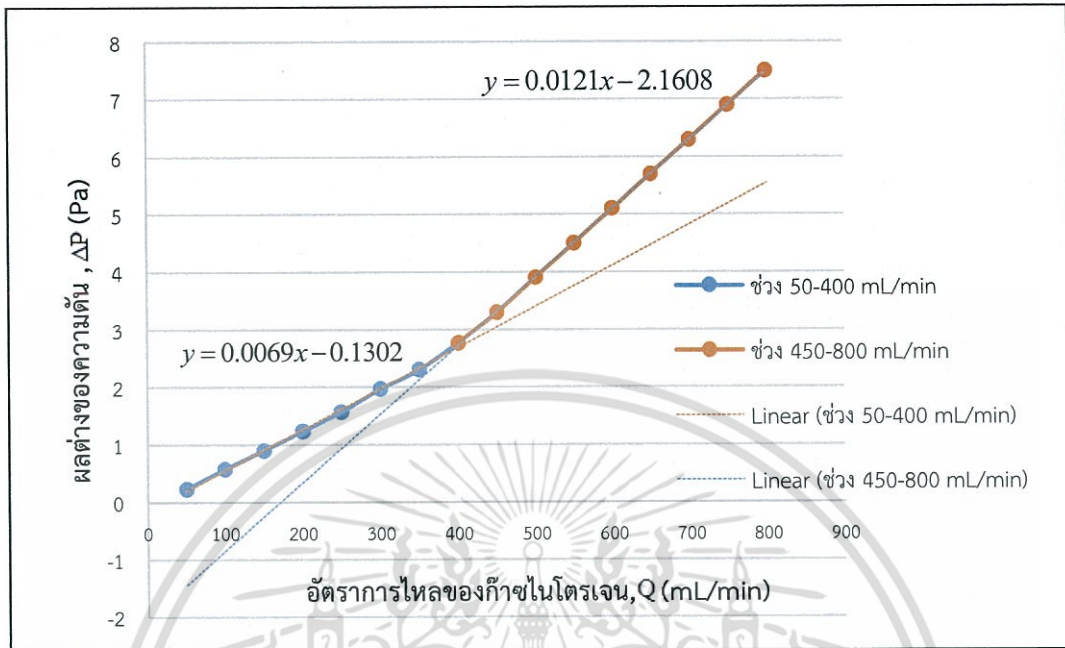
4.2 วิเคราะห์ผลจากการทดลองทั้ง 3 ขั้นตอน



รูปที่ 4.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลของก๊าซไนโตรเจน, Q (mL/min) กับผลต่างของความดัน, ΔP (Pa) ซึ่งได้จากการวิเคราะห์ผลการทดลองจากการทดลองทั้ง 3 ผลการทดลอง

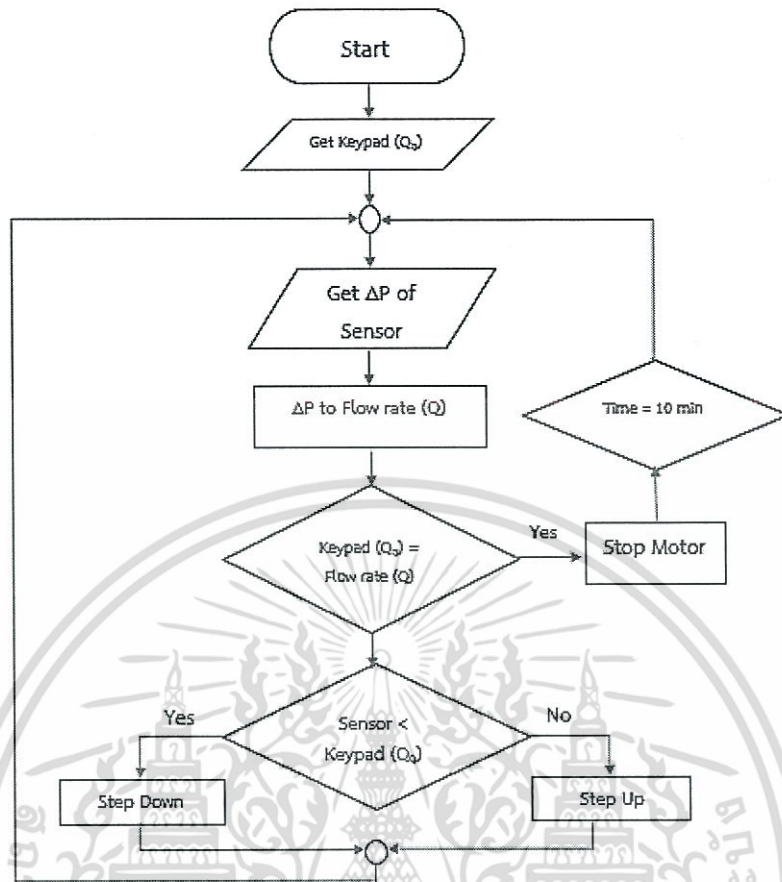
จากการทดลองทั้ง 3 ตอน จะพบว่า ตอนที่ 1 การวิเคราะห์จากการทฤษฎีของแบร์นูลี เพื่อคำนวณหาผลต่างของความดัน ตอนที่ 2 การวิเคราะห์ผลจากการทดสอบในโปรแกรมโซลิดเวิร์ค (SolidWorks) และตอนที่ 3 การวิเคราะห์ผลจากการทดสอบในทางปฏิบัติโดยใช้เครื่องมือวัดอัตราการไหล (Flow rate model 0550E) มีแนวโน้มกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลของก๊าซไนโตรเจน, Q (mL/min) กับ ผลต่างของความดัน, ΔP (Pa) เป็นไปในทิศทางเดียวกันในรูปแบบฟังก์ชันยกกำลัง ดังนั้นเราจึงเลือกสมการที่ได้จากการวิเคราะห์ผลจากการทดสอบในทางปฏิบัติโดยใช้เครื่องมือวัดอัตราการไหล (Flow rate model 0550E) เพื่อหาอัตราการไหลของก๊าซไนโตรเจนของเครื่องมือวัดที่ออกแบบ เนื่องจากเป็นค่าที่ได้จากการทดสอบจริงและมีความถูกต้อง

นำสมการที่ได้จากการวิเคราะห์ผลจากการทดสอบในทางปฏิบัติโดยใช้เครื่องมือวัดอัตราการไหล (Flow rate model 0550E) มาใช้กับเครื่องมือวัดที่ออกแบบ



รูปที่ 4.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลของก๊าซไนโตรเจน, Q (mL/min) กับ ผลต่างของความดัน, ΔP (Pa) ซึ่งได้จากการวิเคราะห์ผลการทดลองจากการทดสอบในทางปฏิบัติ โดยใช้เครื่องมือวัดอัตราการไหล (Flow rate model 0550E)

จากรูปที่ 4.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลของก๊าซไนโตรเจน, Q (mL/min) กับ ผลต่างของความดัน, ΔP (Pa) ซึ่งได้จากการวิเคราะห์ผลการทดลองจากการทดสอบในทางปฏิบัติโดยใช้เครื่องมือวัดอัตราการไหล (Flow rate model 0550E) นำสมการที่ได้จากการวิเคราะห์ผลจากการทดสอบในทางปฏิบัติโดยใช้เครื่องมือวัดอัตราการไหล (Flow rate model 0550E) คือ สมการ $y = 0.0017x^{1.2465}$ มาใช้กับเครื่องมือวัดที่ออกแบบ โดยเราทำการแบ่งเป็นเส้นตรง 2 ช่วง (Partial Linear) โดยช่วงที่ 1 ตั้งแต่ช่วงอัตราการไหลของก๊าซไนโตรเจน ที่ 50 mL/min ถึง 400 mL/min คือ $y = 0.0069x - 0.1302$ และช่วงที่ 2 ตั้งแต่ช่วงอัตราการไหลของก๊าซไนโตรเจน ที่ 400 ถึง 800 mL/min คือ $y = 0.0121x - 2.1608$ เพื่อนำมาใช้กับเครื่องมือวัดที่ออกแบบ ให้มีความเที่ยงตรงและมีความแม่นยำมากยิ่งขึ้น จากนั้นนำสมการที่แบ่งเป็น 2 ช่วงข้างต้นนี้มาเขียนโปรแกรมชุดคำสั่งให้กับเครื่องมือที่ได้ออกแบบเพื่อควบคุมอัตราการไหลของก๊าซในช่วง 0 – 800 mL/min โดยจะมีแผนภาพดังนี้



รูปที่ 4.8 แผนผังการทำงานของชุดคำสั่งควบคุมอัตราการไหลของก๊าซไนโตรเจน

จากแผนภาพจะสามารถอธิบายโปรแกรมควบคุมได้ดังนี้ เริ่มจากมีการรับค่าภายนอกจากแป้นพิมพ์ (Key pad) โดยจะสามารถใส่เป็น ตัวเลขอัตราการไหลของก๊าซไนโตรเจนที่ต้องการในหน่วย mL/min ในช่วง 0-800 mL/min เพื่ออัตราการไหลของก๊าซไนโตรเจนที่ต้องการควบคุม จากนั้นตัวโปรแกรมจะไปรับค่าผลต่างของความดันที่ตรวจจับด้วยเซ็นเซอร์ เมื่อได้ค่าผลต่างของความดันก็จะถูกเปลี่ยนเป็นอัตราการไหลของก๊าซไนโตรเจนตามสมการของเครื่องมือที่ใส่ไปข้างต้น หลังจากนั้นก็จะเข้าเงื่อนไขที่ว่า อัตราการไหลของก๊าซไนโตรเจนที่ใส่เข้าไปจากแป้นพิมพ์ (Key pad) เท่ากับค่า อัตราการไหลของก๊าซไนโตรเจนที่ได้จากผลต่างความดันจากการตรวจจับโดยเซ็นเซอร์หรือไม่ ถ้าเท่ากับระบบควบคุมก็จะหยุดทำงานได้อัตราการไหลตามที่ต้องการ ถ้าไม่เท่ากับก็จะมีเงื่อนไขเพิ่มเติมเข้ามาเพื่อปรับให้เกิดการควบคุมจนกว่าจะเท่ากับ (โดยใช้ตัวสตีปเต็ปมอเตอร์) เมื่อได้ค่าอัตราการไหลของก๊าซไนโตรเจนตามที่ต้องการระบบควบคุมก็จะหยุด และ หลังจากนั้น 10 นาที ระบบจะมีการทำงานครั้งต่อไปเพื่อการตรวจสอบค่าอัตราการไหลของก๊าซไนโตรเจนใหม่อยู่ตลอด

ตัวอย่างการคำนวณเพื่อหาอัตราการไหลของก๊าซไนโตรเจน

- ช่วงที่ 1 อัตราการไหล ที่ 50 ถึง 400 mL/min คือ $y = 0.0069x - 0.1302$
- ช่วงที่ 2 อัตราการไหล ที่ 450 ถึง 800 mL/min คือ $y = 0.0121x - 2.1608$

โดยที่ x คือ อัตราการไหลของก๊าซไนโตรเจน (mL/min)

y คือ ผลต่างของความดัน (Pa)

วิธีการคำนวณ

จากสมการช่วงที่ 1

$$y = 0.0069x - 0.1302$$

ตัวอย่างเช่น ลำดับที่ 2 ผลต่างของความดันมีค่าเท่ากับ 0.5667 Pa

$$0.5667 = 0.0069x - 0.1302$$

$$0.5667 + 0.1302 = 0.0069x$$

$$0.6969 = 0.0069x$$

$$x = \frac{0.6969}{0.0069}$$

$$x = 101.0000$$

ดังนั้น อัตราการไหลของก๊าซไนโตรเจน เท่ากับ 101.0000 mL/min

จากสมการช่วงที่ 2

$$y = 0.0121x - 2.1608$$

ตัวอย่างเช่น ลำดับที่ 9 ผลต่างของความดันมีค่าเท่ากับ 3.3000 Pa

$$3.3000 = 0.0121x - 2.1608$$

$$3.3000 + 2.1608 = 0.0121x$$

$$5.4608 = 0.0121x$$

$$x = \frac{5.4608}{0.0121}$$

$$x \approx 451.3058$$

ดังนั้น อัตราการไหลของก๊าซไนโตรเจน ประมาณ 451.3058 mL/min

4.2.1 ตอนที่ 4 การทดลองจากการทดสอบในทางปฏิบัติโดยใช้เครื่องมือวัดที่ออกแบบ

ในการทดลองนี้เป็นการนำเครื่องมือวัดที่ออกแบบไปทดสอบวัดอัตราการไหลของก๊าซไนโตรเจนในห้องปฏิบัติการ โดยแสดงผลที่หน้าจอของเครื่องมือวัด เรากำหนดช่วงอัตราการไหลของก๊าซ ที่วัดตั้งแต่ 0 mL/min ถึง 800 mL/min จากการป้อนชุดคำสั่ง เพื่อควบคุมอัตราการไหลของก๊าซไนโตรเจน และเพื่อดูประสิทธิภาพของเครื่องมือวัดที่ออกแบบจึงมีการนำตัววัดอัตราการไหลแบบโรตารีมิเตอร์ที่มีในห้องปฏิบัติการมาใช้เทียบเคียงค่าที่วัดได้จากเครื่องมือวัดอีกทางหนึ่งเพื่อประกอบการพิจารณาประสิทธิภาพของเครื่องมือวัดนั้นช่วงการวัดจึงเพิ่มไม่เท่ากันเนื่องจากวัดค่าช่วงอัตราการไหล ที่โรตารีมิเตอร์ในห้องปฏิบัติการสามารถวัดได้

ตารางที่ 4.4 ผลการทดลองจากการวิเคราะห์ผลจากการทดสอบในทางปฏิบัติ

โดยใช้เครื่องมือวัดที่ออกแบบ โดยแสดงผลจากตัวเซ็นเซอร์ตรวจจับผลต่างของความดัน

ค่าอัตราการไหลของก๊าซไนโตรเจน , Q (mL/min)	อัตราการไหลของก๊าซไนโตรเจน , Q (mL/min)		ค่าเฉลี่ย	เปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อน (%)
	Min	Max		
20	18.96	26.96	22.28	11.42
30	26.69	34.42	30.55	1.85
40	34.42	42.15	38.28	4.28
50	49.88	57.61	53.74	7.49
60	57.61	65.34	61.47	2.45
70	65.34	73.07	69.20	1.13
80	73.07	80.00	76.53	4.33
90	88.53	96.26	92.39	2.66
100	96.26	103.99	100.12	0.12
200	196.74	204.47	200.60	0.30
250	243.12	250.85	246.98	1.20
400	396.21	401.72	398.96	0.25
500	495.38	500.89	498.13	0.37
600	594.56	600.07	597.31	0.44
750	748.83	754.34	751.58	0.21
800	798.41	803.92	801.16	0.14
เปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อน (%) เฉลี่ย				2.41

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3 การอภิปรายผล

ตอนที่ 1 การวิเคราะห์จากสมการทฤษฎีของแบร์นูลลี เพื่อคำนวณหาผลต่างความดัน

จากการทดลองหาความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลของก๊าซไนโตรเจนกับผลต่างของความดันโดยการวิเคราะห์จากสมการทฤษฎีของแบร์นูลลีซึ่งเป็นการคำนวณผลต่างของความดันตามสมการ

$$\Delta P = \left(\frac{Q}{AC_d} \right)^2 \frac{\rho}{2} \left(\left(\frac{A}{a} \right)^2 - 1 \right)$$

ซึ่งคำนวณผลต่างของความดัน ณ อัตราการไหลต่างๆ ซึ่งได้กำหนดช่วงอัตราการไหลของก๊าซไนโตรเจนที่ 50 mL/min ถึง 800 mL/min เพื่อศึกษาผลต่างของความดันที่เปลี่ยนไปเมื่ออัตราการไหลของก๊าซเพิ่มขึ้น โดยให้อัตราการไหลของก๊าซไนโตรเจนที่ 50 mL/min เป็นค่าเริ่มต้น และเพิ่มอัตราการไหลของก๊าซไนโตรเจนครั้งละ 50 mL/min จนถึง 800 mL/min ซึ่งจากการทดลองพบว่า เมื่ออัตราการไหลเพิ่มขึ้น ผลต่างของความดันก็เพิ่มขึ้นและจากกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลของก๊าซไนโตรเจน, Q (mL/min) กับ ผลต่างของความดัน, ΔP (Pa) เป็นกราฟฟังก์ชันยกกำลังซึ่งเป็นไปตามหลักการทฤษฎีของแบร์นูลลีที่ได้กล่าวข้างต้น

ตอนที่ 2 การวิเคราะห์ผลจากการทดสอบในโปรแกรมโซลิดเวิร์ค (SolidWorks)

จากการทดลองหาความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลของก๊าซไนโตรเจนกับผลต่างของความดันโดยการทดสอบท่อเวนทูรีที่ออกแบบในโปรแกรมโซลิดเวิร์ค (SolidWorks) โดยการวิเคราะห์อัตราการไหลของก๊าซไนโตรเจนจากฟังก์ชัน การวิเคราะห์อัตราการไหลในท่อ (Flow Simulation) เพื่อศึกษาผลต่างของความดันที่เปลี่ยนไปเมื่ออัตราการไหลเพิ่มขึ้น โดยให้อัตราการไหลของก๊าซไนโตรเจนที่ 50 mL/min เป็นค่าเริ่มต้น และเพิ่มอัตราการไหลของก๊าซไนโตรเจนครั้งละ 50 mL/min จนถึง 800 mL/min ซึ่งจากการทดลองพบว่า กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลของก๊าซไนโตรเจน, Q (mL/min) กับ ผลต่างของความดัน, ΔP (Pa) กราฟมีแนวโน้มเป็นฟังก์ชันยกกำลัง เช่นเดียวกับการทดลองตอนที่ 1 หรือตามทฤษฎีของแบร์นูลลี

ตอนที่ 3 การวิเคราะห์ผลจากการทดสอบในทางปฏิบัติโดยใช้เครื่องมือวัดอัตราการไหล (Flow rate model 0550E)

จากการทดลองหาความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลของก๊าซไนโตรเจนกับผลต่างของความดันโดย การทดสอบท่อเวนทูรี เพื่อศึกษาผลต่างของความดันที่เปลี่ยนไปเมื่ออัตราการไหลของก๊าซเพิ่มขึ้น โดยให้อัตราการไหลของก๊าซไนโตรเจนที่ 50 mL/min เป็นค่าเริ่มต้น และเพิ่มอัตราการไหลของก๊าซไนโตรเจนครั้งละ 50 mL/min จนถึง 800 mL/min ซึ่งจากการทดลองพบว่า กราฟระหว่างอัตราการไหลของก๊าซไนโตรเจนกับผลต่างของความดัน เป็นกราฟที่มีแนวโน้มเป็นไปตามการทดลองที่ 1 และ 2 ซึ่งให้ง่ายต่อการออกแบบเครื่องมือวัด จึงทำให้กราฟเป็นกราฟแบบเส้นตรงบางส่วน (Partial linear) เพื่อประสิทธิภาพของการวัดและการควบคุมของเครื่องมือที่แม่นยำ

ตอนที่ 4 การทดลองจากการทดสอบในทางปฏิบัติโดยใช้เครื่องมือวัดที่ออกแบบ

จากการทดลองนำเครื่องมือวัดที่ออกแบบไปทดสอบวัดอัตราการไหลของก๊าซไนโตรเจนในห้องปฏิบัติการ โดยแสดงผลที่หน้าจอของเครื่องมือวัด เรากำหนดช่วงอัตราการไหลของก๊าซไนโตรเจน ที่วัดตั้งแต่ 0 mL/min ถึง 800 mL/min จากการป้อนชุดคำสั่ง เพื่อควบคุมอัตราการไหลของก๊าซไนโตรเจน และเพื่อดูประสิทธิภาพของเครื่องมือวัดที่ออกแบบ

จากการทดลองพบว่า ค่าอัตราการไหลของก๊าซที่เซ็นเซอร์ตรวจจับผลต่างของความดัน ที่อ่านได้สอดคล้องกับค่าอัตราการไหลของก๊าซไนโตรเจนที่อ่านได้จากตัวโรตاميเตอร์ ซึ่งจากการทดลองมีความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยอยู่ที่ร้อยละ 2.41 ของค่าที่วัดได้ สามารถวัดและควบคุมอัตราการไหลในช่วง อัตราการไหลของก๊าซไนโตรเจนที่ 20 mL/min ถึง 800 mL/min ได้อย่างมีประสิทธิภาพ



บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

การทดลองในตอนที่ 1 การวิเคราะห์จากสมการทฤษฎีของแบร์นูลลี เพื่อคำนวณหาผลต่างของความดัน, ตอนที่ 2 การวิเคราะห์ผลจากการทดสอบในโปรแกรมโซลิดเวิร์ค (SolidWorks) และตอนที่ 3 การวิเคราะห์ผลจากการทดสอบในทางปฏิบัติโดยใช้เครื่องมือวัดอัตราการไหล (Flow rate model 0550E) แล้วนำเครื่องมือวัดที่ออกแบบไปวัดอัตราการไหลของก๊าซไนโตรเจนในห้องปฏิบัติการได้ผลการทดลองดัง ตอนที่ 4 การทดลองจากการทดสอบในทางปฏิบัติโดยใช้เครื่องมือวัดที่ออกแบบ จึงสามารถสรุปได้ว่าเครื่องมือวัดที่ออกแบบสามารถวัดอัตราการไหลของก๊าซไนโตรเจนได้จริง ซึ่งค่าที่ต่ำสุดที่สามารถวัดอัตราการไหลของก๊าซไนโตรเจนได้คือ 20 mL/min และสูงสุดที่เครื่องมือสามารถวัดได้คือ 800 mL/min ซึ่งเครื่องมือวัดที่ออกแบบนั้นมีการใช้สมการของเครื่องมือที่ได้จากการสอบเทียบเครื่องมือวัดใน ตอนที่ 3 การวิเคราะห์ผลจากการทดสอบในทางปฏิบัติโดยใช้เครื่องมือวัดอัตราการไหล (Flow rate model 0550E) ซึ่งเครื่องมือวัดอัตราการไหลของก๊าซ (Flow rate model 0550E) มีความแม่นยำและเชื่อถือได้สามารถวัดได้ในช่วง 0 mL/min – 1000 mL/min ดังนั้นจึงได้สมการ $y = 0.0017x^{1.2465}$ ในการสอบเทียบในตอนที่ 3 นี้มาใช้กับเครื่องมือวัด จากการวิเคราะห์สมการด้วยกราฟจะอยู่ในรูปของฟังก์ชันยกกำลังซึ่ง จะเห็นได้ว่า มีแนวโน้มของกราฟ เช่นเดียวกับทางทฤษฎีแบร์นูลลีและการวิเคราะห์ผลจากการทดสอบในโปรแกรมโซลิดเวิร์ค (SolidWorks) แต่สมการยังคงมีความแตกต่างกันอยู่ เนื่องจากมาตรวัดอัตราการไหลแบบเวนทูรี ที่ออกแบบนั้น มีความแตกต่างจากอุดมคติ และการสร้างแบบมาตรวัดอัตราการไหลแบบเวนทูรี มีความคลาดเคลื่อนจากการวิเคราะห์ผลการทดสอบจากโปรแกรมโซลิดเวิร์ค (SolidWork) เนื่องจาก มุม ขนาด องศา จุดเชื่อมต่อต่างๆ ความราบเรียบภายในวัสดุที่กลึงในโรงงาน ของมาตรวัดอัตราการไหลแบบเวนทูรี อาจมีความคลาดเคลื่อนไปจากการออกแบบในโปรแกรมโซลิดเวิร์ค (SolidWork) จึงทำให้ผลต่างของความดัน เกิดการสูญเสีย (Pressure Drop) ในเครื่องมือวัดที่ออกแบบมากขึ้น หลังจากนั้นจึงนำสมการที่ได้จากการสอบเทียบ หรือ ตอนที่ 3 มาใช้กับเครื่องมือวัดที่ออกแบบ เพื่อความแม่นยำในการวัดและการควบคุมอัตราการไหลของก๊าซไนโตรเจนของเครื่องมือวัด จึงได้แบ่งสมการข้างต้นนี้ออกเป็นเส้นตรง 2 ช่วง (partial linear) ซึ่งผลทำให้เครื่องมือวัดที่ออกแบบสามารถวัดได้แม่นยำและถูกต้องมากยิ่งขึ้น ซึ่งมีความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยอยู่ที่ร้อยละ 2.41 ของค่าที่วัดได้ และ เป็นไปตามวัตถุประสงค์ของงานวิจัย คือ นำเครื่องมือวัดที่ออกแบบไปใช้งานในห้องปฏิบัติการได้จริง

5.2 ข้อเสนอแนะ

จากการทดลอง การออกแบบระบบวัดควรที่จะมีการพัฒนาเพิ่มเติม อาทิเช่น ในส่วนของการออกแบบควรจะมีการศึกษาเพิ่มเติมเพื่อให้ค่ามีความใกล้เคียงกับค่าในอุดมคติ มากที่สุด และ เทคนิคที่ใช้ในการวัดควรที่จะมีการศึกษาเพิ่มเติม โดยเฉพาะในเรื่องของการนำตัวเซ็นเซอร์วัดผลต่างของความดันมาใช้กับเครื่องมือวัดที่ออกแบบ ควรจะเลือกอุปกรณ์หรือเทคนิคที่เหมาะสมกับการวัดก๊าซ เพื่อการวัดที่มีประสิทธิภาพมากที่สุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

- [1] การไหลภายในท่อ. ม.ป.ป. [online]. เข้าถึงได้จาก :
me2.eng.chula.ac.th/course/351/section2/ch7.pdf
- [2] ความรู้พื้นฐานก่อนการเลือกใช้วาล์ว. ม.ป.ป. [online]. เข้าถึงได้จาก :
<http://www.maekuangudomthara.com/images/knowledge/eed85fdd96ccb6ea4a1bb331d1099008.pdf>
- [3] ญาณี จันสิงโท และณัฐกานต์ พูลผล. 2554. “การศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างความแตกต่างความดันต่อความสูง อุณหภูมิ และปริมาตร”. (ปริญญาานิพนธ์วิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาฟิสิกส์ประยุกต์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง).
- [4] ทฤษฎีการไหลในท่อ. ม.ป.ป. [online]. เข้าถึงได้จาก :
http://irrigation.rid.go.th/rid4/km04/_data/57/general-05.pdf
- [5] นโม นาคน้ำ. 2558. “เครื่องกำเนิดสัญญาณรบกวน”. (ปริญญาานิพนธ์วิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาฟิสิกส์ประยุกต์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง).
- [6] นวภัทรา หนูนา และพิมพ์เพ็ญ พรเฉลิมพงศ์. 2555. Flow measurement / การวัดการไหล. [online]. เข้าถึงได้จาก : <http://www.foodnetworksolution.com>
- [7] นวภัทรา หนูนา และพิมพ์เพ็ญ พรเฉลิมพงศ์. 2555. Differential pressure / ความดันแตกต่างหรือความดันดิฟเฟอเรนเชียล. [online]. เข้าถึงได้จาก :
<http://www.foodnetworksolution.com>
- [8] นวภัทรา หนูนา และพิมพ์เพ็ญ พรเฉลิมพงศ์. 2555. Pressure measurement / การวัดความดัน. [online]. เข้าถึงได้จาก : <http://www.foodnetworksolution.com>
- [9] วินัส ชัพพลาย. ม.ป.ป. ตัวอย่างการใช้งาน Arduino + Relay Module ควบคุมการปิดเปิดเครื่องใช้ไฟฟ้า. [online]. เข้าถึงได้จาก :
<http://www.thaieasyelec.com>
- [10] วินัส ชัพพลาย. ม.ป.ป. บทความ Arduino คืออะไร. [online]. เข้าถึงได้จาก :
<http://www.thaieasyelec.com>
- [11] สเต็ปเปอร์ มอเตอร์ (STEPPER MOTOR). ม.ป.ป. [online]. เข้าถึงได้จาก :
http://www.adisak51.com/home/step_motor.pdf
- [12] Ashrafzadeh, S.M. and Ghassemi, H. 2014. “Experimental and numerical investigation on the performance of small-sized cavitating venturis”. Flow Measurement and Instrumentation. 42(2015) : 6–15.
- [13] A4988 S Tepper Motor ไดรเวอร์สำหรับ Arduino Mega RAMPS S Anguinololu. n.d. [online]. Available : <https://th.aliexpress.com/item/100pcs-Lot-Geeetech-Red-RepRap-StepStick-Pololu-A4988-Stepper-Motor-Driver-For-Sanguinololu-Arduino-MegaRAMPS/32219248854.html?spm=2114.54010208.4.42.TNjUAK>.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [14] Hari Vijay, P and Subrahmanyam, V. 2014. “CFD SIMULATION ON DIFFERENT GEOMETRIES OF VENTURIMETER”. International Journal of Research in Engineering and Technology. 07(2014) : 456-463.
- [15] element14 community. ม.ป.ป. เซ็นเซอร์รับรู้ความดันส่วนต่าง (Differential Pressure Sensors: SPD 610). [online]. เข้าถึงได้จาก : <https://www.element14.com/community/search.jspa?q=sensor>.
- [16] RS Components Ltd. n.d. เซ็นเซอร์รับรู้ความดันส่วนต่าง (Differential Pressure Sensors). [online]. เข้าถึงได้จาก : <http://uk.rs-online.com/web/p/pressure-sensors/7191119/>.
- [17] LM1117T 3.3V 800MA LOW DROP-OUT VOLTAGE REGULATOR. n.d. [online]. Available : <http://www.oddwires.com/lm1117t-3-3v-800ma-low-drop-out-voltage-regulator-4-pack/>.
- [18] Pololu Robotics&Electronics. n.d. A4988 Stepper Motor Driver Carrier. [online]. Available : <https://www.pololu.com/product/1182>.



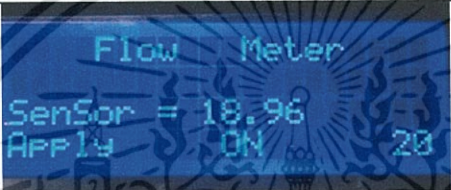


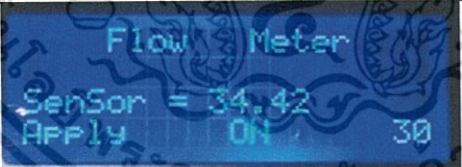

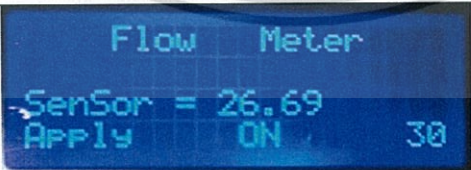


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก ตารางแสดงผลการวิจัย



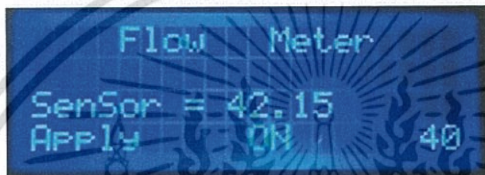

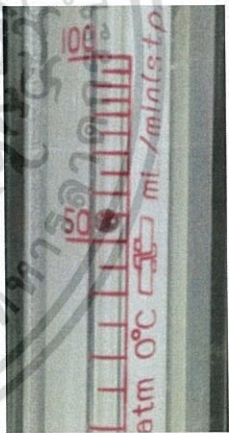
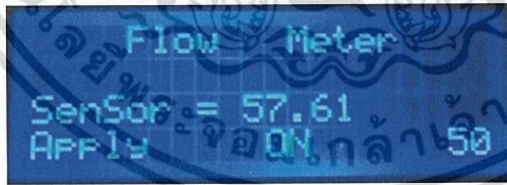
ผลการทดลองจากการวิเคราะห์ผลจากการทดสอบในทางปฏิบัติโดยใช้เครื่องมือวัดที่ออกแบบ โดยแสดงผลจากตัวเซ็นเซอร์ตรวจจับผลของความดันต่าง

ตารางแสดงผลการทดลองการวิเคราะห์ผลจากการทดสอบในทางปฏิบัติโดยใช้เครื่องมือวัดที่

ค่าอัตราการไหลของก๊าซไนโตรเจน, Q (mL/min)	ภาพจากจอแสดงผลค่าอัตราการไหลของก๊าซไนโตรเจน, Q (mL/min)	ภาพจากโรตاميเตอร์ค่าอัตราการไหลของก๊าซไนโตรเจน, Q (mL/min)
20	 Q = 18.96 mL/min	
	 Q = 26.69 mL/min	
30	 Q = 34.42 mL/min	
	 Q = 26.69 mL/min	





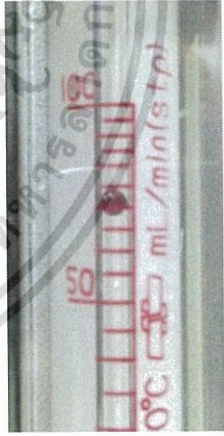
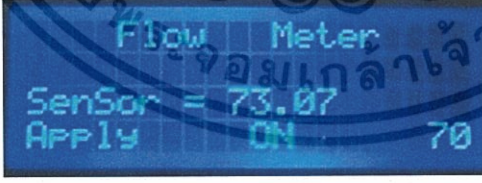
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางแสดงผลการทดลองการวิเคราะห์ผลจากการทดสอบในทางปฏิบัติโดยใช้เครื่องมือวัดที่ (ต่อ)

ค่าอัตราการไหลของก๊าซไนโตรเจน , Q (mL/min)	ภาพจากจอแสดงผล ค่าอัตราการไหลของก๊าซไนโตรเจน, Q (mL/min)	ภาพจากโรตاميเตอร์ ค่าอัตราการไหลของก๊าซ ไนโตรเจน , Q (mL/min)
40	 <p>$Q = 34.42$ mL/min</p>	
	 <p>$Q = 42.15$ mL/min</p>	
50	 <p>$Q = 49.88$ mL/min</p>	
	 <p>$Q = 57.61$ mL/min</p>	


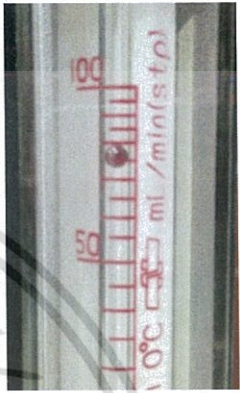
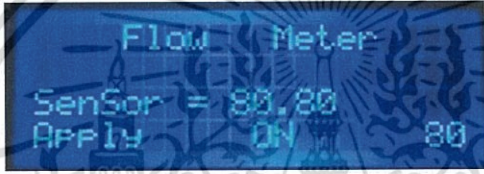

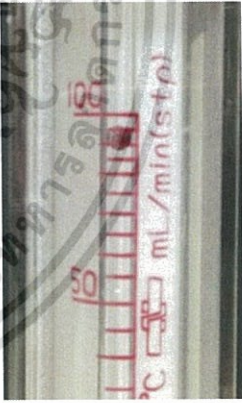

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางแสดงผลการทดลองการวิเคราะห์ผลจากการทดสอบในทางปฏิบัติโดยใช้เครื่องมือวัดที่ (ต่อ)

ค่าอัตราการไหลของก๊าซไนโตรเจน , Q (mL/min)	ภาพจากจอแสดงผล ค่าอัตราการไหลของก๊าซไนโตรเจน, Q (mL/min)	ภาพจากโรตารีมิเตอร์ ค่าอัตราการไหลของก๊าซ ไนโตรเจน ,Q (mL/min)
60	 <p>Q = 57.61 mL/min</p>	
	 <p>Q = 65.34 mL/min</p>	
70	 <p>Q = 65.34 mL/min</p>	
	 <p>Q = 73.07 mL/min</p>	


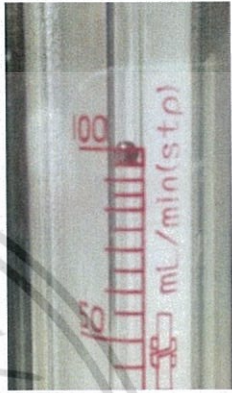
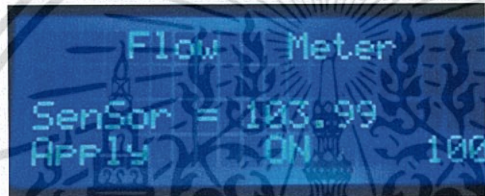

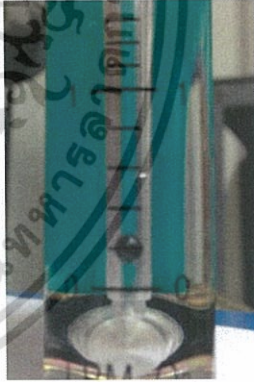
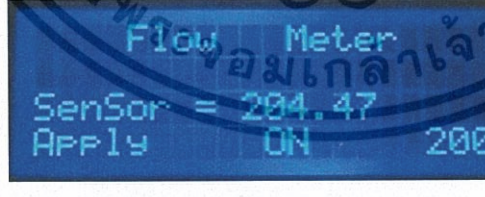
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางแสดงผลการทดลองการวิเคราะห์ผลจากการทดสอบในทางปฏิบัติโดยใช้เครื่องมือวัดที่ (ต่อ)

ค่าอัตราการไหลของก๊าซไนโตรเจน, Q (mL/min)	ภาพจากจอแสดงผล ค่าอัตราการไหลของก๊าซไนโตรเจน, Q (mL/min)	ภาพจากโรตาริเตอร์ ค่าอัตราการไหลของก๊าซไนโตรเจน, Q (mL/min)
80	 <p>Q = 73.07 mL/min</p>	
	 <p>Q = 80.00 mL/min</p>	
90	 <p>Q = 88.53 mL/min</p>	
	 <p>Q = 96.26 mL/min</p>	




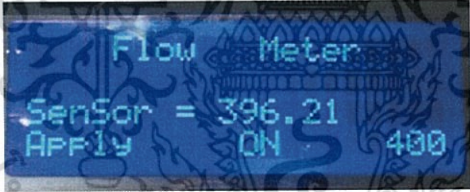

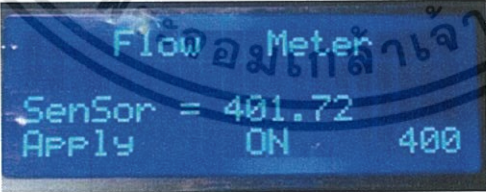
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางแสดงผลการทดลองการวิเคราะห์ผลจากการทดสอบในทางปฏิบัติโดยใช้เครื่องมือวัดที่ (ต่อ)

ค่าอัตราการไหลของก๊าซไนโตรเจน, Q (mL/min)	ภาพจากจอแสดงผล ค่าอัตราการไหลของก๊าซไนโตรเจน, Q (mL/min)	ภาพจากโรตاميเตอร์ ค่าอัตราการไหลของก๊าซไนโตรเจน, Q (mL/min)
100	 <p>$Q = 96.26$ mL/min</p>	
	 <p>$Q = 103.99$ mL/min</p>	
200	 <p>$Q = 196.74$ mL/min</p>	
	 <p>$Q = 204.47$ mL/min</p>	




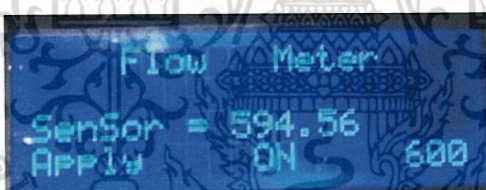

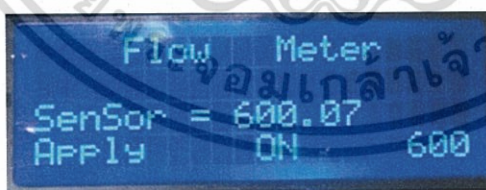
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางแสดงผลการทดลองการวิเคราะห์ผลจากการทดสอบในทางปฏิบัติโดยใช้เครื่องมือวัดที่ (ต่อ)

ค่าอัตราการไหลของก๊าซไนโตรเจน, Q (mL/min)	ภาพจากจอแสดงผล ค่าอัตราการไหลของก๊าซไนโตรเจน, Q (mL/min)	ภาพจากโรตاميเตอร์ ค่าอัตราการไหลของก๊าซไนโตรเจน, Q (mL/min)
250	 <p>Q = 243.12 mL/min</p>	
	 <p>Q = 250.85 mL/min</p>	
400	 <p>Q = 396.21 mL/min</p>	
	 <p>Q = 401.72 mL/min</p>	

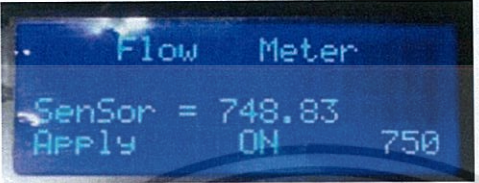

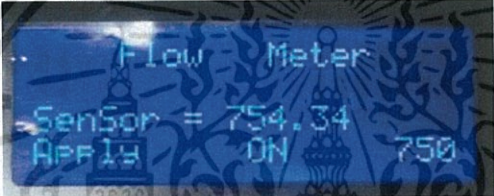



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางแสดงผลการทดลองการวิเคราะห์ผลจากการทดสอบในทางปฏิบัติโดยใช้เครื่องมือวัดที่ (ต่อ)

ค่าอัตราการไหลของก๊าซไนโตรเจน, Q (mL/min)	ภาพจากจอแสดงผล ค่าอัตราการไหลของก๊าซไนโตรเจน, Q (mL/min)	ภาพจากโรตاميเตอร์ ค่าอัตราการไหลของก๊าซไนโตรเจน, Q (mL/min)
500	 <p>$Q = 495.38$ mL/min</p>	
	 <p>$Q = 500.89$ mL/min</p>	
600	 <p>$Q = 594.56$ mL/min</p>	
	 <p>$Q = 600.07$ mL/min</p>	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางแสดงผลการทดลองการวิเคราะห์ผลจากการทดสอบในทางปฏิบัติโดยใช้เครื่องมือวัดที่ (ต่อ)

ค่าอัตราการไหลของก๊าซไนโตรเจน, Q (mL/min)	ภาพจากจอแสดงผล ค่าอัตราการไหลของก๊าซไนโตรเจน, Q (mL/min)	ภาพจากโรตاميเตอร์ ค่าอัตราการไหลของก๊าซไนโตรเจน, Q (mL/min)
750	 <p>Q = 748.83 mL/min</p>	
	 <p>Q = 754.34 mL/min</p>	
800	 <p>Q = 798.41 mL/min</p>	
	 <p>Q = 803.92 mL/min</p>	

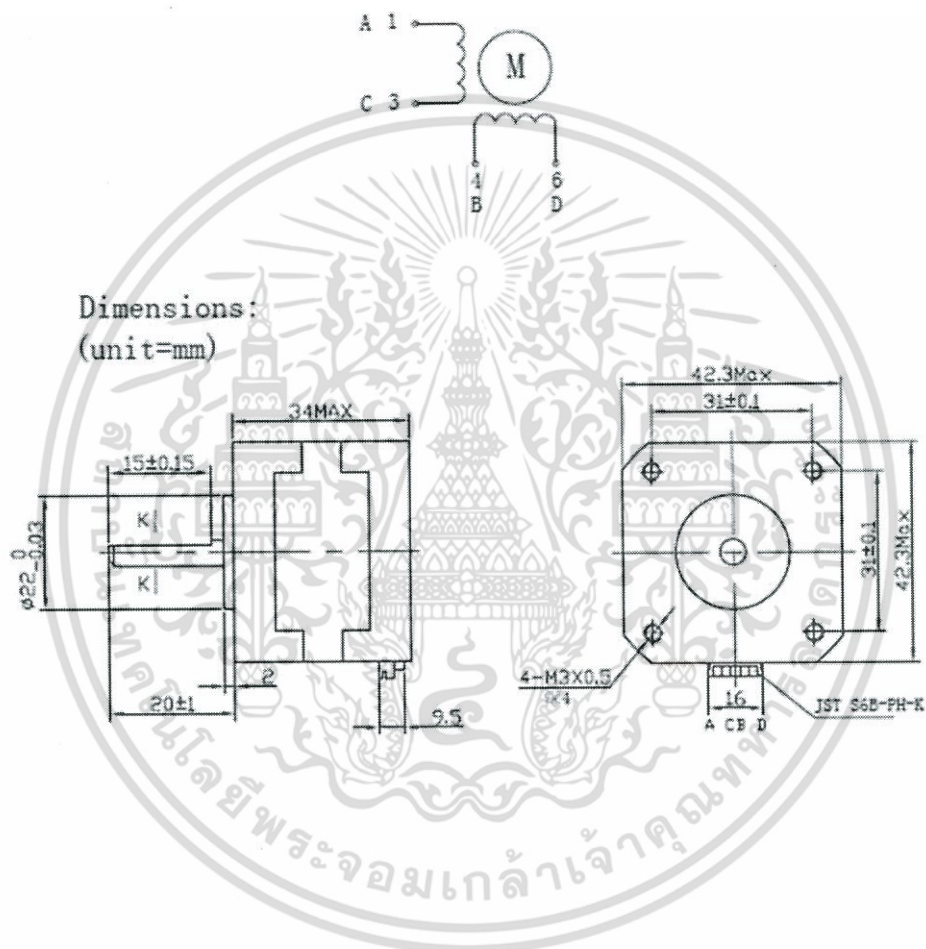
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข Datasheet

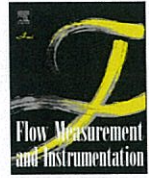
Stepper Motor (42HB34F08AB) Schematic

HYBRID STEPPING MOTOR MOD. 42HB34F08AB

Wiring Diagram:



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



Experimental and numerical investigation on the performance of small-sized cavitating venturis



Seyed Mehdi Ashrafzadeh, Hojat Ghassemi*

Department of Mechanical Engineering, Iran University of Science and Technology, Narmak, Tehran 16846-13111, Iran

□ □ □ □ □ □ □ □ □ □

□ □ □ □ □ □ □ □ □ □

Article history:

Received 13 September 2013
Received in revised form
18 December 2014
Accepted 27 December 2014
Available online 14 January 2015

Keywords:

Cavitating venturi
Flow controller
Flow meter
Two-phase flow
CFD

Cavitating venturis (CVs) are simple devices which can be used in different industrial applications to passively control the flow rate of fluids. In this research the operation of small-sized CVs is characterized and their capabilities in regulating the mass flow rate were experimentally and numerically investigated. The effect of upstream and downstream pressures, as well as geometrical parameters such as the throat diameter, throat length, and diffuser angle on the mass flow rate and critical pressure ratio were studied. For experimental data acquisition, three CVs with throat diameters of 0.7, 1 and 1.5 mm were manufactured and tested. The fabricated CVs were tested at different upstream and downstream pressures in order to measure their output mass flow rate and to obtain their characteristic curves. The flow inside the CVs was also simulated by computational fluid dynamics. The numerical results showed agreement with the experimental data by a maximum deviation of 5–10% and confirmed that the numerical approach can be used to predict the critical pressure ratio and mass flow rate at cavitating condition. It is found that despite the small size of venturis, they are capable of controlling the mass flow rate and exhibit the normal characteristics. By decreasing the throat diameter, their cavitating mode became more limited. Results also show that increasing the diffuser angle and throat length leads to a decrease in critical pressure ratio.

© 2015 Elsevier Ltd. All rights reserved.

1. Introduction

Cavitating venturis (CVs) are very simple flow-control devices which are used in various industrial applications. A cavitating venturi is consisted of a converging section (nozzle), a short and straight throat section, and a diverging section (diffuser) as shown in Fig. 1.

CVs can be used as an alternative device for complex and expensive active controlling systems such as servo valves due to their brilliant features like simplicity, low cost and weight, lack of moving parts, high reliability and long life. It is also shown that by applying a discharge coefficient and using only upstream pressure, the cavitating venturi can be used as a flowmeter with a high degree of accuracy in a wide range of mass flow rate [1].

As a liquid passes through the converging section, according to Bernoulli's law, its velocity increases. As a result, the pressure simultaneously decreases until it reaches the vapor pressure of the liquid. At this time cavitation starts to occur at the throat of the venturi and a mixture of vapor and liquid forms as a bubbly flow in this region.

It is shown that speed of sound in water–vapor mixture is much lower than either pure component. For example, the sonic speed at room temperature is about 430 m/s in steam, and about 1420 m/s in pure water whereas the speed of sound in water and vapor mixture is as low as a few tens of meters per second [2,3].

When the downstream pressure, P_{out} , is less than about 0.8 of the upstream pressure, P_{in} , cavitation occurs and the velocity of the fluid reaches the sonic speed. Therefore, the flow inside the venturi becomes choked. Further decrease in downstream pressure will not cause any increase in the mass flow rate, and the flow rate becomes independent from the downstream pressure. Thus, the main capability of CVs is providing constant flow rate under varying downstream pressure. They can also be used as very precise and accurate flow meters by exerting a discharge coefficient and measuring only the upstream pressure.

Randall [4] was one of the pioneers in working on CVs. He explained the principles of operation and details of construction of this very interesting device. In the mid 1990s, a series of investigations were pursued in connection with venturis used in an ammonia cooling loop for the freedom space station. Ungar et al. [5] investigated the performance of CVs under low inlet sub-cooling. They found that when a CV is operating at its unchoked mode, if the downstream pressure is decreased, overflow can occur. The overflow condition has a hysteresis fashion and will persist

* Corresponding author. Tel.: +98 21 77491228; fax: +98 21 77240448.
E-mail address: h_ghassemi@iust.ac.ir (H. Ghassemi).

Nomenclature

A_{th}	throat area (m ²)	P_{sat}	saturation pressure (Pa)
D	inlet diameter (m)	R_e	evaporation source term (kg/m ⁴)
d	throat diameter (m)	R_c	condensation source term (kg/m ⁴)
f	Darcy friction factor (-)	R_B	bubble radius (m)
h_f	hydraulic loss in pipe (m)	v_k	velocity of phase k (m/s)
K_l	loss coefficient through the venturi (-)	v_v	vapor phase velocity (m/s)
L	venturi length (m)	Greek symbol	
l	throat length (m)	α	vapor volume fraction (-)
\dot{m}_{choked}	choked mass flow rate (kg/s)	α_k	volume fraction of phase k (-)
\dot{m}_r	mass flow ratio (-)	μ_m	viscosity of the mixture N s
P	pressure (Pa)	μ_t	turbulent viscosity N s
P_B	bubble surface pressure (Pa)	ρ	density (kg/m ³)
P_{in}	inlet pressure (Pa)	ρ_m	density of the mixture (kg/m ³)
P_{out}	outlet pressure (Pa)	ρ_v	vapor density (kg/m ³)
P_r	pressure ratio (-)	ρ_l	liquid density (kg/m ³)
$P_{r,crit}$	critical pressure ratio (-)		

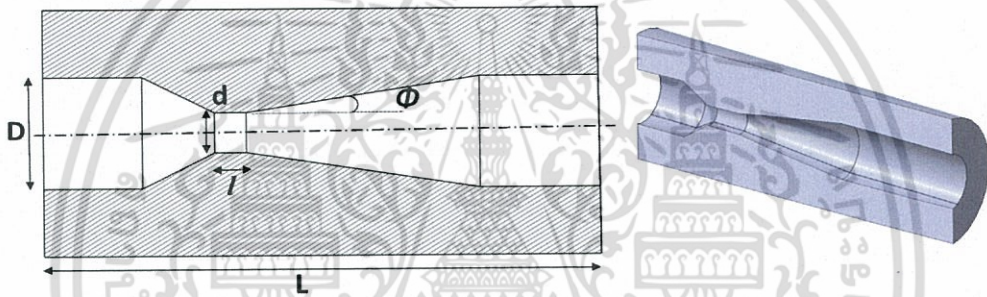


Fig. 1. Schematic of a cavitating venturi.

until the downstream pressure is decreased to a much lower value. Ungar and Mal [6] also investigated alternative geometries to mitigate the overflow condition by placing an aft-facing step in the throat region of the CVs used in the thermal control system of freedom space station. Liou et al. [7] conducted performance tests on small CVs under low inlet sub-cooling. Their tests were carried out under choked flow, overflow, and recovery conditions.

Navickas and Chen [8] used an axisymmetric computational fluid dynamics program to model the cavitating venturi flow characteristics. Their results indicated that computational methods are effective in obtaining relative magnitudes of significant parameters affecting the performance of CVs. Xu and Heister [9] simulated various venturi orifice cavitating flows using a homogeneous flow model. They characterized cavitating venturi flow rate, oscillation frequency, and cavitation extent for a wide range of conditions and compared the results with experimental data. Some studies were also conducted on liquid helium to realize its properties in cooling systems. Harada, Murakami and Ishii [10] studied cavitation phenomena of liquid helium inside a venturi channel by PIV method. Ishimoto and Kamijo [11] numerically investigated cavitating flow of liquid helium in a venturi channel.

Moholkar and Pandit [12] investigated the dynamics of the bubbly flow in hydrodynamic cavitation with the help of numerical simulations. They used a continuum bubbly mixture model to study the one-dimensional cavitating flow through a venturi. They explained the effect of parameters such as downstream recovery pressure, venturi/pipe area ratio, initial bubble void fraction, and initial bubble size in the flow on the dynamics of flow. Vortmann, Schnerr and Seelecke [13] developed a new model which takes

non-equilibrium effects into account to simulate cavitation and high-speed flows in very small-scale injector nozzles.

Delale, Schnerr and Sauer [14] purposed a new model to solve the quasi-one-dimensional steady-state cavitating nozzle flow problem. They employed a homogeneous bubbly liquid flow model and the nonlinear dynamics of cavitating bubbles were described by a modified Rayleigh–Plesset equation.

Chen, Lu and Wu [15] developed a numerical code to investigate unsteady turbulent cavitation flows in a venturi type section. They used modified RNG $k-\epsilon$ model to simulate turbulent flows. They also treated cavitation by introducing a barotropic law that strongly links the fluid density to the pressure variations.

A large number of studies were also carried out in the field of cavitation by the Turbomachinery and Cavitation team of LEGI (Laboratoire des Écoulements Géophysiques et Industriels, Grenoble, France). Barre et al. [16] investigated cavitating flows in venturis by means of experiments as well as computational fluid dynamics (CFD). They performed new double optical probe measurements and special data processing methods to estimate the void ratio and velocity fields for cold water flows. They also applied a CFD code, previously developed in this group, and compared experimental findings with numerical results. Goncalves and Patella [17,18] developed a one-fluid compressible Reynolds-Averaged Navier–Stokes (RANS) solver with a preconditioning scheme to simulate the flow inside the venturi geometry. They studied cavitation phenomenon by two different EOS models. Since turbulence modeling plays a major role in capturing unsteady behaviors, Goncalves [19] studied the effects of different turbulent models on the precision of numerical results.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Nouri, Mirsaedi and Moghimi [20] used large eddy simulation (LES) to model the cavitating flow at a Venturi-type section. LES method has the advantage of directly resolving large energy-containing structures, whereas most of these structures are modeled in RANS. This gives LES an improved fidelity over RANS and the results are more accurate.

Ulas [21] designed an experimental setup to verify the CVs performance at specified flow rates. He tested the CVs at different upstream pressures but the influence of downstream pressures was not studied. Ghassemi and Fasih [1] studied the performance of CVs under different upstream and downstream pressures as well as time-varying downstream pressures. Their results showed that for downstream/upstream pressure ratios less than 0.8, the mass flow rate is constant and independent of the downstream pressure.

In many applications, only a very small amount of fluid flow is allowed, i.e. a few grams per second. An example is supplying the proper amount of fuel to the engine in the fuel injection systems. At such instances, CVs with small throat area would be a very good candidate, which would give a constant amount of fuel independent of the varying pressure of the combustion chamber. Due to the small area of the throat, some issues may arise in the performance of the CVs related to the viscous effects and frictional losses.

As can be seen by reviewing the previous studies in this field, investigating the effect of geometrical parameters on the performance of small-sized cavitating venturis has not been performed so far. Therefore, the main purpose of this work is to investigate the effect of geometrical parameters, such as throat diameter, throat length, and diffuser angle, on the mass flow rate, critical pressure ratio and application range of CVs.

In this research the performance of small-sized cavitating venturis was experimentally and numerically investigated. Verifying capabilities of CVs in controlling the flow rate under different upstream and downstream pressures was one of the goals of this study. Determination of application range of small-sized CVs was another issue which was raised in this study.

2. Theoretical background

CVs have two modes of operation, choked mode and all-liquid mode. At the first one, cavitation occurs in the throat and the flow becomes choked. Under such a condition, the mass flow rate becomes constant and independent from the downstream pressure. At the same time, cavitation causes formation of a two-phase flow in the throat and diffuser section. The location where the vapor area terminates, i.e. liquid flow reattaches to the diffuser, is a function of the downstream pressure. As the downstream pressure increases, the reattachment point moves upstream towards the throat. When the downstream pressure reaches a critical value such that the reattachment point reaches the throat, no cavitation will occur. This is the situation where the all-liquid mode starts. The flow rate will then decrease with any further increase in the downstream pressure. At this mode, the CV acts similar to a standard all-liquid venturi. The all-liquid flow rate is then a function of the pressure drop across the venturi. Usually the operation of a CV is determined by a characterization curve, schematically shown in Fig. 2.

Under either condition, the actual measured mass flow rate of CV, \dot{m}_{actual} , can be expressed in dimensionless form as

$$\dot{m}_r = \frac{\dot{m}_{actual}}{\dot{m}_{choked}} \quad (1)$$

For the case of choked flow, the mass flow ratio is unity, i.e. $\dot{m}_r = 1$. The venturi's downstream pressure can also be expressed

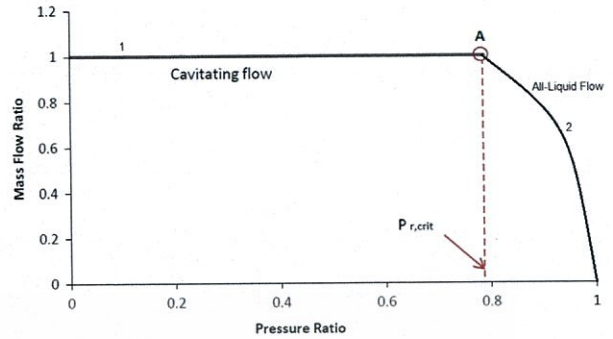


Fig. 2. Characterization curve of cavitating venturi.

in dimensionless form of the pressure ratio, P_r :

$$P_r = \frac{P_{out} - P_{sat}}{P_{in} - P_{sat}} \quad (2)$$

In Fig. 2, zone 1 of the curve shows the choked mode and zone 2 shows the all-liquid mode of operation. Point A corresponds to the critical pressure ratio ($P_{r,crit}$) where the reattachment point reaches the throat and cavitation no longer occurs. By decreasing the pressure ratio to a value below the critical value, the venturi returns to its choked mode.

For a steady and choked flow condition, the static pressure reaches to a minimum at the throat, and is assumed to be equal to the saturation pressure of the liquid at the inlet temperature. The cavitating venturi's mass flow rate (\dot{m}_{choked}) can then be determined through the Bernoulli's equation as

$$\dot{m}_{choked} = A_{th} \sqrt{2\rho(P_{in} - P_{sat})} \quad (3)$$

For a non-choked and all-liquid condition, a flow loss coefficient must be applied to account for the friction loss through the venturi (K_l). K_l depends on geometrical features of CV as well as the flow regime. The cavitating venturi's mass flow rate at the non-choked mode (\dot{m}_{liq}) is determined as

$$\dot{m}_{liq} = A_{th} \sqrt{2\rho(P_{in} - P_{out})/K_l} \quad (4)$$

Based on Eqs. (1), (3) and (4) the mass flow ratio for the all-liquid flow can be expressed as

$$\dot{m}_r = \frac{\dot{m}_{liq}}{\dot{m}_{choked}} = \sqrt{\frac{(P_{in} - P_{out})}{K_l(P_{in} - P_{sat})}} \quad (5)$$

Assuming negligible saturation pressure compared to inlet pressure, i.e. $P_{sat}/P_{in} \approx 0$ leads to the final form of mass flow rate ratio as following:

$$\dot{m}_r = \frac{\dot{m}_{liq}}{\dot{m}_{choked}} = \sqrt{\frac{1 - P_r}{K_l}} \quad (6)$$

Eq. (6) represents the equation of the second zone of characteristic curve of CV shown in Fig. 2 whereas the equation of the first zone is

$$\dot{m}_r = 1 \quad (7)$$

The critical pressure ratio, $P_{r,crit}$, at the intersection of the choked flow zone and the all-liquid flow zone, can be obtained by equalization of Eqs. (6) and (7):

$$P_{r,crit} = 1 - K_l \quad (8)$$

Cavitation is generally assumed to occur wherever the pressure ratio is less than the critical value, $P_{r,crit}$. On the other hand, the all-liquid flow is assumed to occur where P_r exceeds $P_{r,crit}$ with $\dot{m}_r < 1$.

3. Experimentals

3.1. Experimental setup

An experimental setup was designed and manufactured to investigate the operational behavior of CVs. Fig. 3 schematically shows the various parts of the used setup.

The setup is consisted of a compressed air cylinder, a pressure regulator, a water tank, a manual ball valve, a needle valve, a cavitating venturi, and a discharge tank for water, and two pressure transducers.

The water tank is pressurized with compressed air. The pressure regulator is used to control the pressure on the water tank. The ball valve, which is located after the water tank, is responsible for opening and closing the circuit. The needle valve, which is located downstream of the venturi, was used to slightly change the downstream pressure. Two pressure transducers are located upstream and downstream of the CV to record the inlet and outlet pressures of the CV. The transducers were obtained from Sensys company model M5156. The discharged water was collected in a container and the corresponding discharge time was recorded by a chronometer. The average mass flow rate was then calculated using the weight of the discharged water divided by the discharge time.

Three cavitating venturis were designed and manufactured to study the effect of the throat size of cavitating venturi on its performance. A schematic presentation of the venturi is shown in Fig. 1. Specifications of the used CVs are given in Table 1.

The angles of converging and diverging sections were selected as 15° and 7° , respectively, in order to obtain minimum pressure losses, following the literature [21]. The diverging angle was then modified in the numerical simulations to investigate the influence of the diffuser angle on the CVs performance. In order to obtain steady and fully developed flows at the entrance and exit of the venturis, two pipes with lengths of 20 cm were fixed at both sides of the venturis. Since the inlet diameter of the venturis is $D=4$ mm, therefore $L_{pipe}=50D$, which is larger than the entrance length required for fully developed flow.

3.2. Experimental methods

To determine the capability of CVs in controlling and regulating the mass flow rate, as well as the influence of the throat diameter on the performance of the venturis, the characteristic curves of the CVs had to be achieved. As such, one needs to obtain the mass flow ratio versus the pressure ratio. The easiest way to achieve this purpose was to fix the upstream pressure and justify the downstream pressure by adjusting the downstream needle valve. For that reason, at the

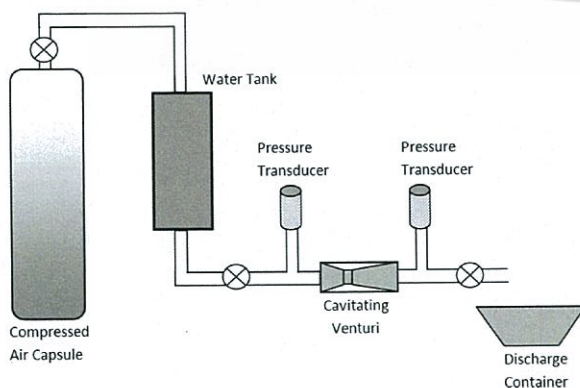


Fig. 3. Schematic of the experimental setup.

Table 1

Specifications of cavitating venturis.

Venturi no.	d (mm)	D (mm)	l (mm)	L (mm)	d/D
1	0.7	4	1	40	0.175
2	1.0	4	1	40	0.250
3	1.5	4	1	40	0.375

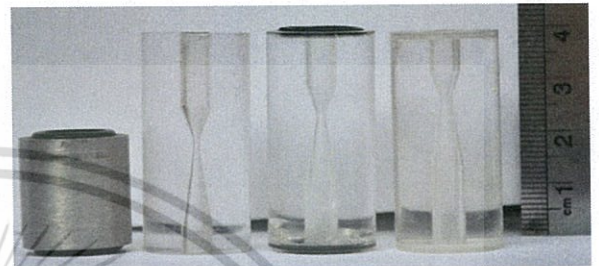


Fig. 4. Cavitating venturis used in the experiments.

beginning of the experiment, the upstream pressure was fixed around 20 bar while the downstream pressure was set about the ambient pressure. During each test, the upstream and downstream pressures, mass of discharged water, and the discharge time were thoroughly recorded. At the next stages, the downstream valve was slightly closed to increase the downstream pressure and to create a different pressure ratio. This process was repeated about 25 times for each CV to gather sufficient data points required to plot the characterization curve of the venturi. It is worth to mention that at the beginning three steel CVs were used. However, since the flow regime inside the venturis could not be seen, three transparent CVs made out of Plexy Glass[®] were replaced with the formers to visualize the flow regime inside the venturis. Fig. 4 shows a photograph of CVs used in this study. Apparently, by using the transparent CVs, one can easily observe whether cavitation has occurred or not at a particular pressure ratio. The details of cavitating region of venturi have been captured by using a high speed camera.

The accuracies of the experimental devices are presented in Table 2. According to these accuracies the uncertainty of the experimental data has been estimated to be around 10%. A brief calculation which gives an estimation of the experimental errors is also provided in Appendix A.

4. Numerical simulation

In order to understand the effects of geometrical parameters on the performance of small sized CVs a numerical approach was employed. For the cases that either implementation of experimental conditions is difficult or experiments are time consuming, this approach is very helpful.

The governing equations of fluid flow in venturi include continuity and momentum equations. Since the flow through the venturi is two-phase the mixture multiphase approach is employed in order to simulate the two-phase flow through the venturi. It must be noted that the primary phase is liquid water and the secondary phase is vapor. The governing equations have the following form:

The continuity equation for the mixture is

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_m) + \nabla \times (\rho_m \vec{v}_m) = 0 \quad (9)$$

where \vec{v}_m is the mass-averaged velocity:

$$\vec{v}_m = \frac{\sum_{k=1}^n \alpha_k \rho_k \vec{v}_k}{\rho_m} \quad (10)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Table 2
Accuracy of the experimental devices.

Source of error	Amount of error
Accuracy of digital scale	0.0001 kg
Accuracy of pressure transducer	100 Pa
Accuracy of chronometer	0.1 s
Accuracy of manufactured venturi	0.00005 m

and ρ_m is density of the mixture:

$$\rho_m = \sum_{k=1}^n \alpha_k \rho_k \quad (11)$$

where n is the number of phases and α_k is the volume fraction of phase k .

The momentum equation for the mixture can be obtained by a summation of the individual momentum equations for all phases. That can be expressed as

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho_m \vec{v}_m) + \nabla \times (\rho_m \vec{v}_m \vec{v}_m) = -\nabla P + \nabla \times \left[(\mu_m + \mu_t) (\nabla \vec{v}_m + \nabla \vec{v}_m^T) \right] \quad (12)$$

where μ_m is the viscosity of the mixture:

$$\mu_m = \sum_{k=1}^n \alpha_k \mu_k \quad (13)$$

Using Reynolds averaging approach turbulence stresses appear in the momentum equation. The $k-\epsilon$ realizable turbulence model was used in order to take account the effect of turbulence. This model which is developed by Shih et al. [22] seems to be a very suitable model for high speed two-phase flows incorporating separation and circulation.

In cavitation, the liquid–vapor mass transfer, i.e. evaporation and condensation, is governed by the vapor transport equation:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\alpha \rho_v) + \nabla \times (\alpha \rho_v \vec{v}_v) = R_e - R_c \quad (14)$$

where v , α , ρ_v , and \vec{v}_v represent vapor phase, vapor volume fraction, vapor density, and vapor phase velocity, respectively. R_e and R_c are mass transfer source terms connected to the growth and collapse of the vapor bubbles and account for the mass transfer between the liquid and vapor phases in cavitation. Schnerr and Sauer model [23] was used for the calculation of net mass transfer from liquid to vapor. The mass transfer source terms are as follows: when $P_v \geq P_l$

$$R_e = \frac{\rho_v \rho_l}{\rho} \alpha (1 - \alpha) \frac{3}{\Re_B} \sqrt{\frac{2(P_v - P)}{P_l}} \quad (15)$$

when $P_v \leq P_l$

$$R_c = \frac{\rho_v \rho_l}{\rho} \alpha (1 - \alpha) \frac{3}{\Re_B} \sqrt{\frac{2(P - P_v)}{P_l}} \quad (16)$$

where ρ_l , P_B , P_v and P are liquid density, bubble surface pressure, vapor pressure and local far-field pressure, respectively.

The bubble radius \Re_B comes from the bubble dynamics which is described by the Rayleigh–Plesset equation describing the growth of a single vapor bubble in a liquid [2].

The CFD Simulations were carried out using ANSYS FLUENT software. The software incorporates a 2D pressure-based solver and calculates the equations in steady-state conditions. It is used in order to simulate the presence of vapor in the throat and diffuser regions and to calculate the mass flow rate of fluid through the venturi.

Continuity and momentum equations were discretized by means of control volume scheme. The First-order upwind method was used for the spatial discretization. The pressure–velocity coupling was utilized by the SIMPLE algorithm.

Geometries were built and simulated exactly similar to the manufactured venturis. A quadrilateral structured mesh was chosen. A special contraction of the mesh is applied in the flow direction around the throat section to capture the two-phase flow more effectively.

To ensure the mesh independency, the geometry was meshed with different mesh sizes given in Table 3. The number of meshes in the throat region (number of divisions perpendicular to the axis of the venturi) is chosen as N_x which is altered from 10 to 80.

The effect of grid size on the pressure distribution and velocity along the venturi axis, as well as the characterization curve of the venturi inside the domain was investigated. The plotted curves, which are not provided here for the sake of brevity, demonstrated that except the first case, which contains coarse meshes, almost identical results were obtained for other mesh schemes, i.e. the system was mesh-independent. Therefore the mesh scheme containing 420 nodes in the flow direction and 20 in the orthogonal direction and a total amount of 8400 cells was chosen. After refining the grid, in order to have a grid-independent solution, the value of y^+ must be checked. Maintaining a value of y^+ for the first grid point, such that it is located in the log law region, when using wall functions is necessary. The value of y^+ near to the boundary was checked and it was in the acceptable range ($y^+ \approx 30\text{--}300$) reported in ANSYS FLUENT theory guide [24].

Fig. 5 shows the computational mesh employed with the details of the grid around the throat. The boundary conditions for the simulation are also schematically shown in Fig. 5. As is shown, half of the geometry is modeled, with an axisymmetric boundary at the centerline.

The simulations were conducted for different upstream and downstream pressures. In order to ensure the convergence of the simulations, as well as accuracy of the results, the following strategies were adopted:

1. The inlet and outlet mass flow rates were both checked to ensure they are equal (Mass Conservation).
2. The residuals were set to reach a specific low value in the software. For example, the residual for the continuity equation was set at 10^{-6} .
3. The pressure and the velocity at a specific point of the domain were checked at different iterations to make sure they converge.
4. In cases where the difference between upstream and downstream pressures was significant, the downstream pressure was slightly reduced upon each convergence to prevent the simulation becoming divergent.

5. Results and discussions

In the following section effects of geometrical parameters of the venturi on its performance have been studied. At the

Table 3
Mesh specification created for mesh independency study.

No.	N_x	No. of cells	Mesh
1	10	2,400	240 × 10
2	20	8,400	420 × 20
3	40	23,600	590 × 40
4	80	60,000	750 × 80

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

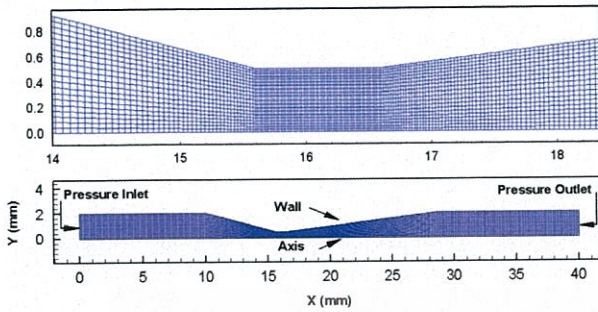


Fig. 5. Domain geometry, grid details, and boundary conditions of the problem.

beginning, the effect of throat size has been numerically investigated and compared with the obtained experimental data. The effects of diffuser angle and throat length on the venturi's operation were inspected numerically. A study has also been conducted on the effect of operating pressure on the cavitation region.

5.1. Effect of throat size on CV performance

After achieving experimental and numerical results, they were plotted for each venturi to compare the prediction of simulations with the experimental results. Fig. 6 shows the characteristic curve of venturi 1 with a throat diameter of 0.7 mm. This curve indicates the non-dimensional mass flow rate of the venturi in terms of the ratio of downstream and upstream pressures. As it is shown, the CV has been capable to maintain a constant mass flow rate up to a pressure ratio of about 0.65. Comparison of the numerical and experimental results shows that the critical pressure ratio as well as discharge coefficient of the venturi are over estimated. This deviation can be referred to uncertainties of the reference measurements and errors in the experimental method discussed in Section 3.2, and also to the shortcomings of the CFD simulations. In the numerical method, the main sources of errors are related to the turbulence model and the wall function.

RANS Models, which are used in the CFD simulation, are approximate turbulence models and often use averaging to simplify the solution of the governing equations of turbulence. Hence they have lower precision in comparison to higher order models and cannot resolve the exact effects of turbulence and dissipation of turbulent kinetic energy.

Another source of error in the numerical method is simplifying assumptions in the wall functions used in CFD simulations. Wall functions are introduced to evade the excessive grid requirements. Wall function models may produce large errors especially in the case of wall bounded flows. This issue is thoroughly discussed elsewhere [25]. In the current study, the mentioned problem exists especially in the throat section of the venturi.

For a better comparison, the mass flow rates obtained experimentally and calculated numerically and theoretically are given in Table 4 for this venturi. As it can be seen, the theoretical mass flow rate which is obtained from Eq. (3) differs more from the experimental result than the numerical one. This can also be attributed to the simplifying assumptions which exist in Bernoulli's equation.

In Fig. 7, experimental data are compared with numerical results for venturi 2 with a throat diameter of 1 mm. As shown, the numerical results well follow the experimental data. Meanwhile, the critical pressure ratio for simulated results is about 0.75 while that for the experimental data is about 0.72. Perhaps the bigger diameter, in comparison with CV 1, which lowers the friction, is responsible for the better fitness of the numerical results.

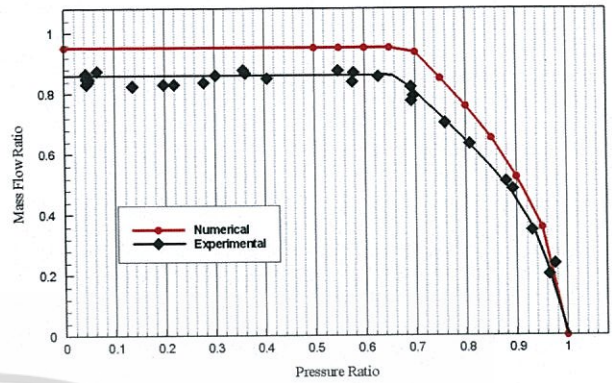


Fig. 6. Numerical characteristic curve of CV 1 vs. experimental data.

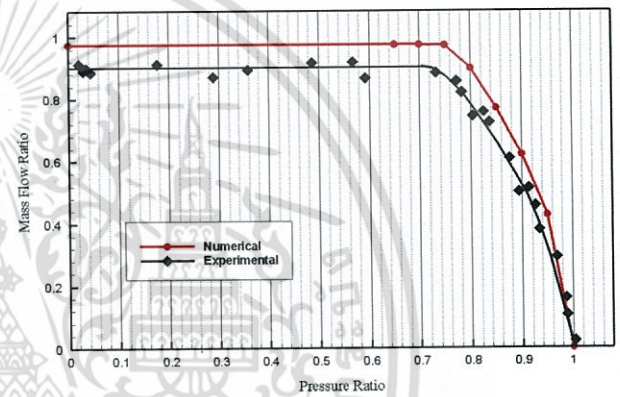


Fig. 7. Numerical characteristic curve of CV 2 vs. experimental data.

Mass flow rates in venturi 2 according to various methods of calculation for a typical pressure ratio of 0.49 are given in Table 4. As it can be seen, the numerical mass flow rate is much closer to the experimental one, comparing with that of theoretical mass flow rate.

Experimental data and numerical results of venturi 3 with a throat diameter of 1.5 mm are shown in Fig. 8. Similar to the previous cases, the calculated critical pressure ratio and discharge coefficient are slightly greater than experimental data. Again, mass flow rates of this venturi according to various methods of calculation are given in Table 4.

As depicted in Figs. 6–8 and Table 4, the numerical results are in good agreement with the trend of experimental data. The experimental discharge coefficient of the venturi as a main performance parameter varies for different venturis, while its numerical values are almost the same. It must be notified that in CVs or other hydraulic devices, the actual mass flow rate differs from the ideal mass flow rate, which is calculated by Bernoulli's relation, due to frictional losses. The ratio of the actual mass flow rate to the ideal mass flow rate is represented by a discharge coefficient and is shown as:

$$C_d = \frac{\dot{m}_{actual}}{\dot{m}_{theory}} \quad (17)$$

In order to figure out the influence of throat diameter on the performance of CV, Fig. 9 shows the characteristic curves of three CVs under consideration. It is shown that by decreasing the throat diameter, the critical pressure ratio also decreases. This means that smaller CVs have shorter ranges of cavitating modes. Venturis 1, 2, and 3 have $P_{r,crit}$ of 0.8, 0.75, and 0.7, respectively. The details of

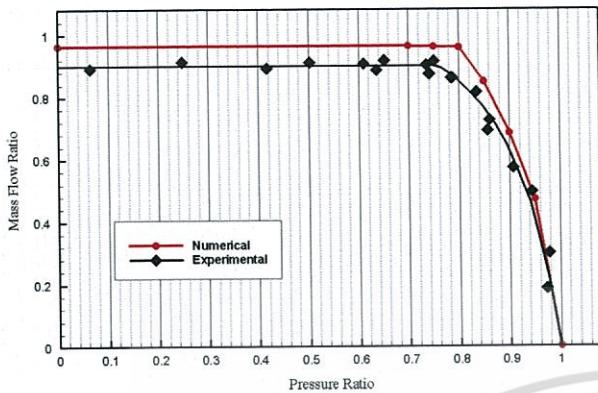


Fig. 8. Numerical characteristic curve of CV 3 vs. experimental data.

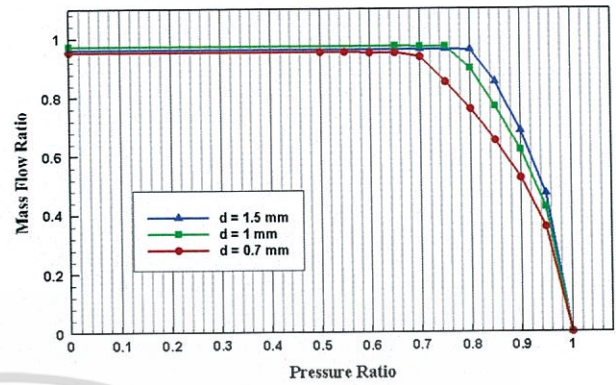


Fig. 9. Characteristic curves of venturis with different throat diameters.

Table 4
Mass flow rates in venturis for a typical pressure ratio.

CV	Inlet pressure (bar)	Outlet pressure (bar)	Pressure ratio	$\dot{m}_{theoretical}$ (kg/s)	$\dot{m}_{numerical}$ (kg/s)	$\dot{m}_{experimental}$ (kg/s)
1	29.70	13.19	0.44	0.0296	0.0281	0.0270
2	35.51	16.80	0.49	0.0788	0.0766	0.0721
3	22.30	11.20	0.50	0.1117	0.1074	0.0983

Table 5
Comparison of discharge coefficients and critical pressure ratios of venturis.

CV	d (mm)	Numerical		Experimental	
		C_d	$P_{r,crit}$	C_d	$P_{r,crit}$
1	0.7	0.95	0.70	0.86	0.65
2	1.0	0.97	0.75	0.90	0.72
3	1.5	0.96	0.80	0.90	0.75

discharge coefficients and critical pressure ratios of venturis obtained from experiments and numerical simulations are provided in Table 5. As stated before, the numerically predicted discharge coefficients are almost the same. A similar fashion can also be seen in the experimental data. The numerically obtained pressure ratios decrease monotonically with decreasing the throat diameter. This conclusion is also confirmed by experimental data.

The simulation results show that by increasing the throat diameter from 0.7 to 1.5, the $P_{r,critical}$ increases from 0.7 to 0.8. The amount of C_d has a very small increase from 0.95 to 0.96. The reason of the increase in $P_{r,critical}$ and C_d can be explained by Darcy-Weisbach equation. This equation gives hydraulic head loss in a pipe and is valid for duct flows of any cross section and for laminar and turbulent flow [26].

$$h_f = f \frac{L V^2}{d 2g} \tag{18}$$

By increasing the diameter, the hydraulic head loss in the throat section becomes less, leading to a lower value of K_l explained in Eq. (4). Also Eq. (8) shows that when K_l gets a lower value, the amount of $P_{r,critical}$ gets closer to the ideal amount of 1. Moreover, since there is less hydraulic loss in the throat of the venturi, the amount of \dot{m}_{actual} will become closer to $\dot{m}_{theoretical}$. Consequently according to Eq. (17), the amount of C_d will increase.

Since the numerical results indicate that computational methods are efficient in obtaining relative magnitudes of significant parameters affecting the performance of CVs, some other studies were conducted using the numerical approach. To ensure that the numerical solution has the ability to resolve the flow details, some essential features of the flow such as vapor formation and separated flow in converging part of the venturi were investigated. Fig. 10 shows the pressure contour of CV 2 with a pressure inlet of 20 bar and a pressure outlet of 14 bar. The latter pressures correspond to the pressure ratio where cavitation starts to occur. It can be seen that the pressure decreases through the converging section until it reaches the vapor pressure of water at 27 °C, i.e. 3.54 kPa. This causes the water to evaporate and the vapor phase is formed in the throat and diffuser sections. Fig. 11 illustrates the void fraction of flow in the throat area.

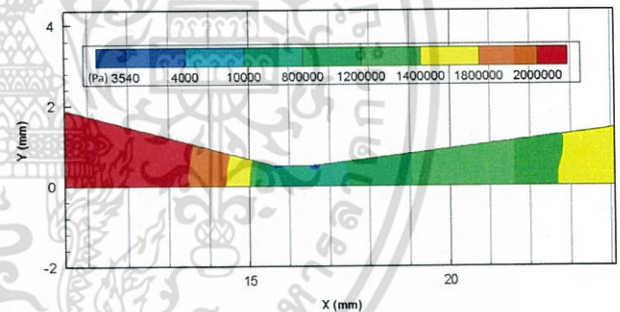


Fig. 10. Pressure contour of venturi 2.

Emerging vapor is clear in the beginning of diverging section. Fig. 12 shows the streamlines of the flow inside the venturi. It can be seen that the flow separates in the diffuser and produces a circulation region close to the wall. This phenomenon causes hydraulic losses and dissipates energy of the flow stream.

5.2. Effect of pressure ratio on the size of cavitation region

Another interesting parameter in CVs which affects the performance of a CV is the cavitation region and the size of the vapor area created. Fig. 13 shows the cavitation region inside CV 2 obtained from numerical results at different downstream pressures (the upstream pressure was fixed at 20 bar). As shown, by decreasing the downstream pressure, the cavitation region becomes larger. This phenomenon has been illustrated for a number of particular downstream pressures.

Fig. 14 presents the real pictures of cavitation regions for different downstream pressures. Still images with high quality and high exposure were taken with a SLR Canon EOS camera. It can be seen that by decreasing the downstream pressure, the flow re-attachment point moves toward the end of the venturi and the cavitation region becomes larger. Frame (a) shows the initiation of cavitation while

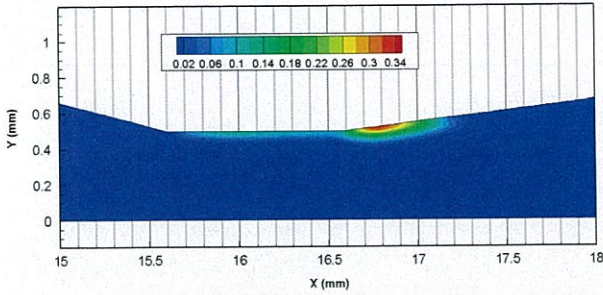


Fig. 11. Void fraction contour of CV 2.

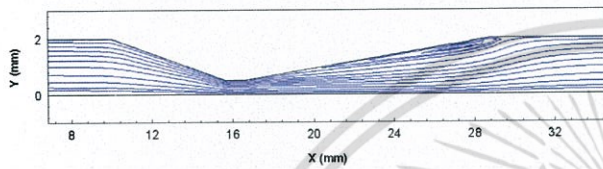


Fig. 12. Streamlines inside CV 2.

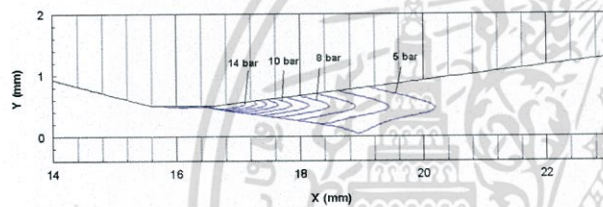


Fig. 13. Growth of cavitation region for different downstream pressures in CV 2.

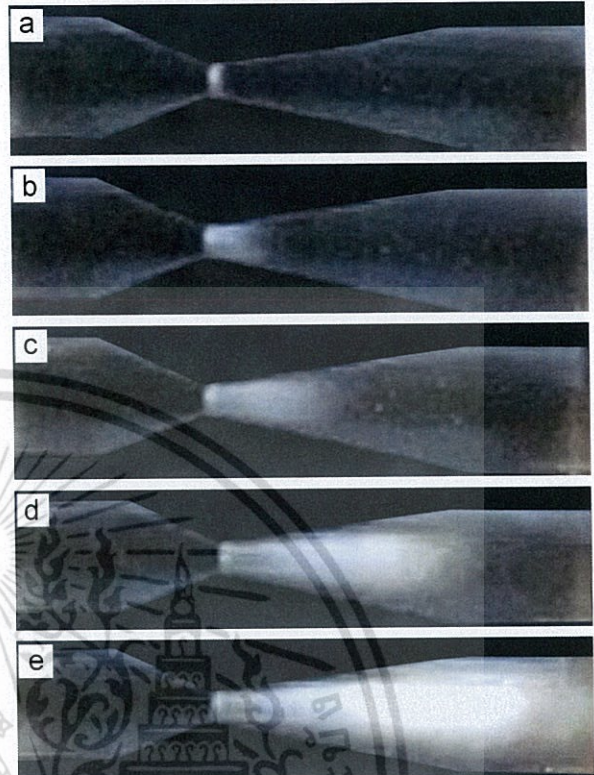


Fig. 14. Cavitation region at different downstream pressures (upstream pressure 20 bar): (a) 14 bar, (b) 13 bar, (c) 10 bar, (d) 5 bar, (e) 1 bar.

frame (e) represents the situation where the downstream valve is completely open, i.e. the downstream pressure is ambient.

5.3. Effect of diffuser angle on CV performance

The diverging angle of the CV is another important geometrical parameter which affects its operation characteristics. As mentioned in literature [21], it is recommended to use a 7° diverging angle due to its minimum pressure loss. Geometrical influence of this angle on the venturi is illustrated in Fig. 15. Here the influence of diffuser angle on the performance of CV was studied. For this reason, CV 2 with a throat diameter of 1 mm was chosen and its performance for diffuser angles of 5, 7, 10, and 15 degrees were thoroughly investigated. The characteristic curves of the mentioned CVs are also shown in Fig. 16. It can be seen, by increasing the diffuser angle, the critical pressure ratio, $P_{r,crit}$, decreases from 0.75 to about 0.6. In other words, the choked mode (cavitating mode) region of the CV becomes more narrow. This phenomenon is not favorable since the CVs are designed to operate in their choked modes. The reason for this observation is the hydraulic loss caused by gradual expansion occurring in the diffuser section of the venturi. By increasing the diffuser angle, the situation becomes more similar to a sudden expansion and the hydraulic losses of the diffuser increase. The expansion induces a loss due to flow separation at the walls and a swirling secondary flow at the diverging section of the venturi. This subject is thoroughly discussed in [26]. According to Eq. (8), $P_{r,crit}$ is proportional to K_f . As such, the more the hydraulic losses, the lower the critical pressure ratio becomes.

Another important point is that in the choked mode, approximately all of the CVs have a unique characteristic curve (see Fig. 16). This means that the discharge coefficient and mass flow rate for all of the CVs remain almost constant. C_d decreases only from 0.93 to 0.92.

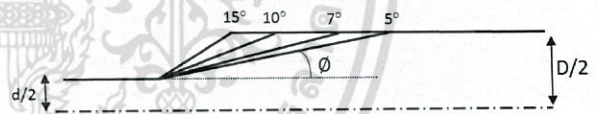


Fig. 15. Geometry of CV 2 with different diffuser angles.

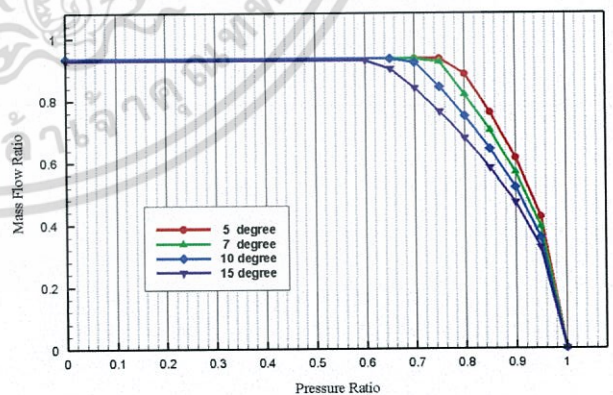


Fig. 16. Performance curves of CV 2 with different diffuser angles.

In this mode, since all of the CVs have a similar entrance, converging, and throat, it is quite expected that the mass flow rate does not change with changing the diffuser angle. In other words, diverging part is placed at the downstream of the choked throat and has no effect on the upstream. On the other hand, in the all-liquid mode, the mass flow rate is related to pressure difference; therefore, it varies by changing the diffuser angle.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

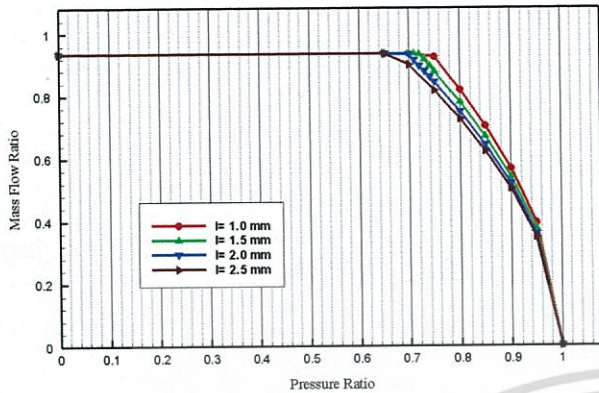


Fig. 17. Performance curves of CV 2 with different throat lengths.

5.4. Effect of throat length on CV performance

Throat is a key part of a cavitating venturi. Its diameter has direct effect on the mass flow rate and critical pressure ratio, as previously discussed. The throat length is another geometrical parameter which its influence on the characteristic curve had to be considered. For this purpose, CV2 with four different throat lengths of 1, 1.5, 2, and 2.5 mm were simulated to investigate this effect.

As shown in Fig. 17, by increasing the length of the throat section, the critical pressure ratio of the CV decreases, also the choked mode of the CV becomes more limited.

Simulation results show that by increasing the length of the throat section from 1 to 2.5 mm, $P_{r,critical}$ reduces from about 0.75 to 0.65. This can also be explained by Darcy–Weisbach equation (Eq. (18)). Increasing the length of the throat section is similar to use a longer pipe, which causes a higher pressure loss due to friction. Again, higher loss means higher lower amount of $P_{r,critical}$.

As a result, the discharge coefficient decreases and the performance curves shift down in all-liquid mode. In the cavitating mode, however, discharge coefficient remains unique for all performance curves, i.e. performance curves lay on each other. It can be claimed that in the non-cavitating mode, no vapor exists in the throat section and the liquid is in direct contact with the solid wall. Therefore, by increasing the throat length, the frictional losses increase. On the other hand, in the cavitating mode, the throat section is partially filled with vapor and the liquid is not in contact with the throat wall and therefore the frictional losses significantly decrease. As such, the discharge coefficient remains almost constant and no difference will be observed in the cavitating section of the performance curves.

6. Conclusions

Effects of several geometrical parameters of small-sized cavitating venturis on their operating characteristics have been studied. Three CVs with throat diameters of 0.7, 1, and 1.5 mm were chosen and characteristic curves for several diverging angles and throat lengths were numerically obtained. An experimental investigation was also conducted to validate the numerical results. It was shown that the numerical findings were in agreement with the experimental results by a maximum deviation of 5–10%. Some remarkable conclusions are as following:

1. CVs in very small sizes are also capable in controlling and regulating the mass flow rate while their characteristic curves are similar to those of ordinary CVs with larger throat sizes.
2. A theoretical correlation was developed in order to predict the relation between hydraulic losses inside the venturis and

critical pressure ratios. This assists one to find the performance region of CVs by means of loss coefficients.

3. By decreasing the throat diameter of CVs, the choked mode region and critical pressure ratio decrease. Discharge coefficient also shows a slight decrease by decreasing the throat diameter. This decrease was, however, less apparent in the simulation results. The reason can be attributed to the existing simplifications in the simulation which do not adequately consider the frictional losses near the wall boundary.
4. By decreasing the diffuser angle from 15 to 5 degrees in the numerical simulations, the critical pressure ratio increases and the discharge coefficient remains constant. By increasing the throat length of CVs, the critical pressure ratio decreases while discharge coefficient does not show any changes.

Acknowledgments

The research council at Iran University of Science & Technology (IUST) is highly acknowledged for its financial support during the course of this project.

Appendix A. A sample calculation of error estimation in mass flow rate

The error in mass flow rate for the venturi with throat diameter of 1 mm is calculated as follows:

- Inlet pressure: 20 bar
- Testing time period: 20 s
- Mass of discharged water: 1200 g

$$\dot{m}_{theory} = A \sqrt{2\rho(P_{in} - P_{sat})} = \frac{\pi}{4} D^2 \sqrt{2\rho(P_{in} - P_{sat})}$$

$$\ln(\dot{m}_{theory}) = \frac{1}{2} \ln(2\rho) + 2 \ln D + \frac{1}{2} \ln(P_{in} - P_{sat})$$

By differentiating:

$$\frac{d\dot{m}_{theory}}{\dot{m}} = 2 \frac{dD}{D} + \frac{1}{2} \frac{d(P_{in} - P_{sat})}{(P_{in} - P_{sat})}$$

$$\frac{\Delta \dot{m}_{theory}}{\dot{m}} = 2 \frac{\Delta D}{D} + \frac{1}{2} \frac{\Delta P_{in}}{P_{in}}$$

$$\frac{\Delta \dot{m}_{theory}}{\dot{m}} = 2 \frac{(0.00005)}{0.001} + \frac{1}{2} \frac{100}{22000,000} = 0.100025$$

This value is for the theoretical mass flow rate. The amount of error for the experimental mass flow rate is calculated as follows:

$$\dot{m}_{exp} = \frac{m}{t}$$

$$\ln \dot{m}_{exp} = \ln m - \ln t$$

For calculating the error the negative sign must be changed to positive after differentiating:

$$\frac{\Delta \dot{m}_{exp}}{\dot{m}} = \frac{\Delta m}{m} + \frac{\Delta t}{t} = \frac{0.0001}{1.2} + \frac{0.1}{20} \approx 0.005$$

And finally the amount of error for C_d is

$$C_d = \frac{\dot{m}_{exp}}{\dot{m}_{theory}}$$

$$\frac{\Delta C_d}{C_d} \approx 0.10025 + 0.005 \approx 0.10525$$

References

- [1] Ghassemi H, Fasih HF. Application of small size cavitating venturi as flow controller and flow meter. *Flow Meas Instrum* 2011;22:406–12.
- [2] Brennen CE. *Cavitation and bubble dynamics*. Oxford Engineering Science Series 1995.
- [3] Kieffer SW. Sound speed in liquid–gas mixtures: water–air and water–steam. *J Geophys Res* 1977;82:2895–904.
- [4] Randall LN. Rocket applications of the cavitating venturi. *J Am Rock Soc* 1952;22:28–38.
- [5] Ungar EK, Dzenitis JM, Sifunentes RT. Cavitating venturi performance at low inlet subcooling: normal operation, overflow and recovery from overflow. *ASME Fluids Engineering Div., publication FED* 1994;vol. 190:309–18.
- [6] Ungar EK, Mal TD. Potential cavitating venturi modifications to improve performance at low inlet subcooling: backward facing steps and threaded throats. *ASME Fluids Engineering Div., Publication FED* 1994;vol. 190:319–27.
- [7] Liou SG, Chen IY, Sheu JS. Testing and evaluation of small cavitating venturis with water at low inlet subcooling. In: *Proceedings of the AIP conference*, vol. 420;1998. p. 479–487.
- [8] Navickas J, Chen L. Cavitating venturi performance characteristics. *ASME Fluids Engineering Div., Publication FED* 1993;vol. 177:153–9.
- [9] Xu C, Heister SD. Modeling cavitating venturi flows. *J Propul Power* 2002;18:1227–34.
- [10] Harada K, Murakami M, Ishii TPIV. measurements for flow pattern and void fraction in cavitating flows of He II and He I. *Cryogenics* 2006;46:648–57.
- [11] Ishimoto J, Kamijo K. Numerical simulation of cavitating flow of liquid helium in venturi channel. *Cryogenics* 2003;43:9–17.
- [12] Moholkar VS, Pandit AB. Numerical investigations in the behaviour of one-dimensional bubbly flow in hydrodynamic cavitation. *Chem Eng Sci* 2001;56:1411–8.
- [13] Vortmann C, Schnerr GH, Seelecke S. Thermodynamic modeling and simulation of cavitating nozzle flow. *Int J Heat Fluid Flow* 2003;24:774–83.
- [14] Delale CF, Schnerr GH, Sauer J. Quasi-one-dimensional steady-state cavitating nozzle flows. *J Fluid Mech* 2001;427:167–204.
- [15] Chen Y, Lu C, Wu L. Modelling and computation of unsteady turbulent cavitation flows. *J Hydrodyn Ser B* 2006;18:559–66.
- [16] Barre S, Rolland J, Boitel G, Goncalves E, Patella RF. Experiments and modeling of cavitating flows in venturi: attached sheet cavitation. *Eur J Mech B Fluid* 2009;28:444–64.
- [17] Goncalves E, Patella RF. Numerical simulation of cavitating flows with homogeneous models. *Comput Fluids* 2009;38:1682–96.
- [18] Goncalves E, Patella RF. Numerical study of cavitating flows with thermodynamic effect. *Comput Fluids* 2010;39:99–113.
- [19] Goncalves E. Numerical study of unsteady turbulent cavitating flows. *Eur J Mech B Fluid* 2011;30:26–40.
- [20] Nouri NM, Mirsaedi SMH, Moghimi M. Large eddy simulation of natural cavitating flows in venturi-type sections. *J Mech Eng Sci* 2011;225:369–81.
- [21] Ulas A. Passive flow control in liquid-propellant rocket engines with cavitating venturi. *Flow Meas Instrum* 2006;17:93–7.
- [22] Shih TH, Liou WW, Shabbir A, Yang Z, Zhu Z. A new $k-\epsilon$ eddy-viscosity model for high Reynolds number turbulent flows—model development and validation. *Comput Fluids* 1995;24:227–38.
- [23] Schnerr GH, Sauer J. Physical and numerical modeling of unsteady cavitation dynamics. In: *Fourth international conference on multiphase flow*, New Orleans, USA, vol. 1; 2001.
- [24] ANSYS FLUENT theory guide, release 14.0. ANSYS INC.; 2014.
- [25] Kalitzin G, Medic G, Iaccarino G, Durbin P. Near-wall behavior of RANS turbulence models and implications for wall functions. *J Comput Phys* 2005;204:265–91.
- [26] White FM. *Fluid mechanics*. 4th ed. McGraw-Hill; 2001.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

CFD SIMULATION ON DIFFERENT GEOMETRIES OF VENTURIMETER

P. Hari Vijay¹, V. Subrahmanyam²

¹M.Tech Scholar, Department of Mechanical Engineering, Kakinada Institute of Technology and Science, Divili, Andhra Pradesh, India

²Associate Professor, Department of Mechanical Engineering, Kakinada Institute of Technology and Science, Divili, Andhra Pradesh, India

Abstract

This paper describe an analytical approach for comparison of four different models to describe the velocity, pressure, turbulence and mass flow rate taken place in the venturimeter and graph are plotted. Venturimeter are most commonly used for flow meters for measuring volumetric or mass flow rate and velocity of fluid flowing through the venturimeter. Hence are also know as variable head meters. Variable head meters work on the principle that a variation of the flow rate through a constriction with a constant cross-sectional area causes a pressure drop suffered by the fluid as it flows through the constriction. The pressure drop is related to the flow rate, and hence variations of the pressure drop can be used to measure variations in the flow rate. Fluent soft ware was used to plot the characteristics of the flow of fluid through the flow meter and gambit software was used to design the 2D model. Two phase computational fluid dynamic calculation, using K-Epsilon model were employed. The numerical results were validated against experimental data from the literature and were found to be in good agreement. The pressure recovery is better in the venturi meter.

Keywords: Gambit, Fluent, K-Epsilon model..

1. INTRODUCTION

In different applications like chemical, paper and minerals processing industries these flow meters are used and also in order to control these processes and to calculate mass balances for these processes it is important to be able to accurately measure the flow rate of these fluids as they move through pipes, conduits, or channels. Variable head meters work on the principle that a variation of the flow rate through a constriction with a constant cross-sectional area causes a pressure drop suffered by the fluid as it flows through the constriction. The pressure drop is related to the flow rate, and hence variations of the pressure drop can be used to measure variations in the flow rate.

The behavior of the fluid as it passes through the venturi is understood by writing the Bernoulli equation using the conditions at the entrance and the throat, and at the throat and the exit. As the fluid passes from the entrance to the throat, its velocity increases and its pressure decrease. Upon passing from the throat to the exit, the velocity of the fluid decreases and its pressure increases, largely recovering to its value at the entrance. The venturimeter is designed to recover most of the pressure drop.

2. PROCEDURE AND GEOMETRY

The current study used FLUENT software, to solve the balance equation using control volume approach. These equations are solved by converting the complex partial differential equations into simple algebraic equations. The simple geometry is done in the GAMBIT software, a fine meshing is done by using successive ratio and later given the boundary conditions for the geometry and for the media. This file imported into Fluent software and has given the input values like velocity, mass flow rate, pressure, temperature etc.,

The geometry was done in the GAMBIT with measurements; pipe diameter is 30mm, radius of the pipe 15mm and length of the pipe 200mm. Defining required boundaries like inlet, outlet and wall of the geometry and mesh under tetrahedron. Defining the boundary conditions for the water. The velocity at inlet is 4m/sec and the gravitational acceleration of 9.81 m/s² in downward flow direction was used.

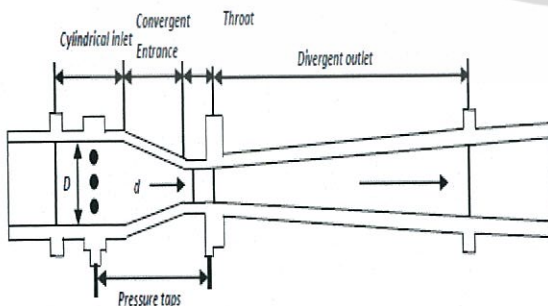


Fig-1.1: Venturimeter

A sketch of a typical venturimeter is shown in Fig 1.1.

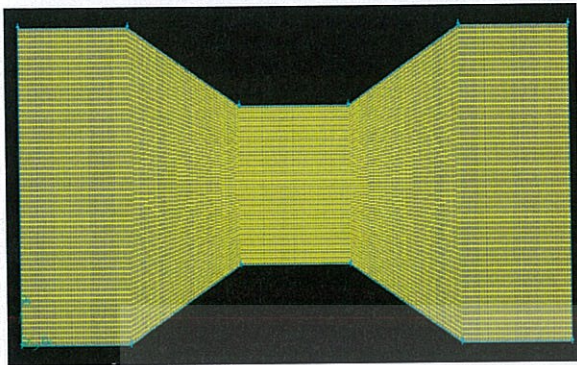


Fig-2.1: First model venturimeter.

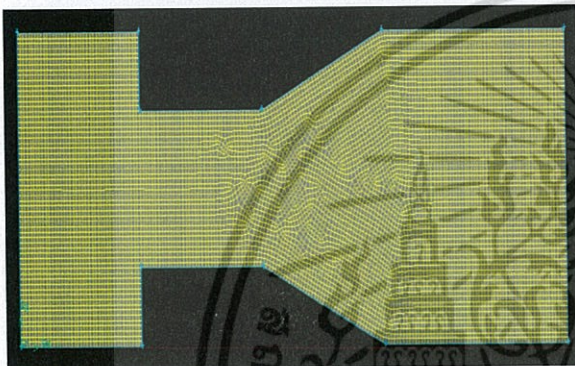


Fig-2.2: Second model venturimeter.

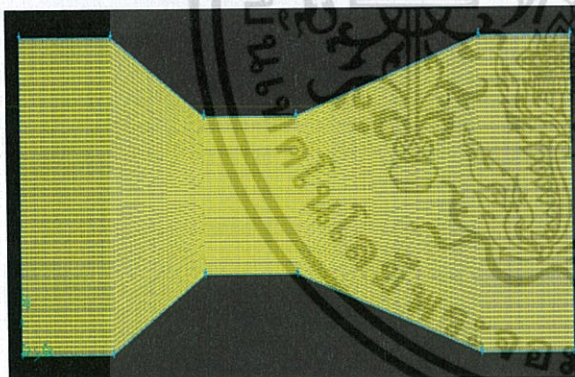


Fig-2.3: Third model venturimeter.

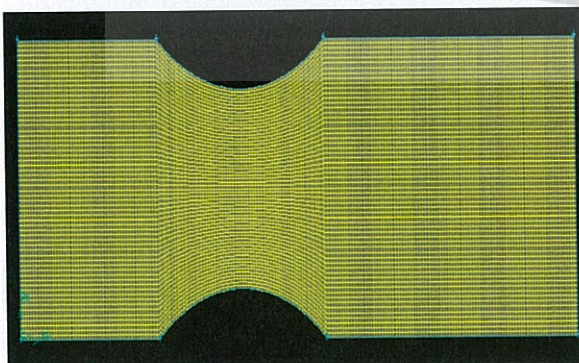


Fig-2.4: Forth model venturimeter.

3. SOLUTION STRATEGY

The simulation is done in the FLUENT based upon the governing equations. The steps followed in the fluent are define Model, define Material, define cell zone, boundary condition, solve, iterate, and analyze results. The convergent of the solution is shown in below fig 3.1.

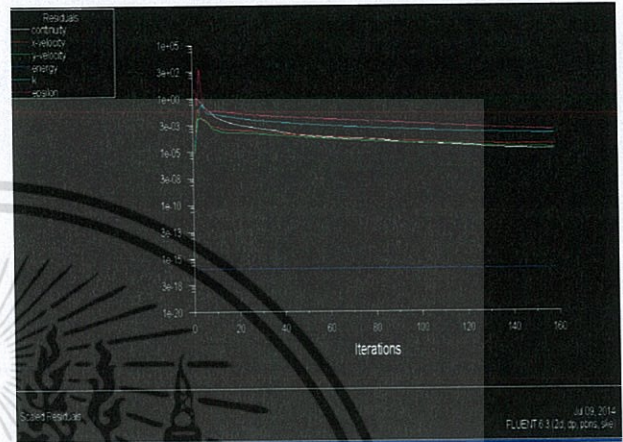


Fig-3.1: Iterations of solution.

3.1. Continuity Equation.

Continuity Equation also called conservation of mass. The overall mass balance is

$$\text{Input} - \text{output} = \text{accumulation}$$

Assuming that there is no storage the Mass input = mass output.

However, as long as the flow is steady (time-invariant), within this tube, since, mass cannot be created or destroyed then the above equation will be

$$m_1 = m_2 \tag{1}$$

$$\frac{dm_1}{dt} = \frac{dm_2}{dt} \tag{2}$$

$$\rho A_1 u_1 = \rho A_2 u_2 \tag{3}$$

$$A_1 v_1 = A_2 v_2 \tag{4}$$

3.2. Momentum Equation and Bernoulli Equation.

It is also called equation of motion .According to Newton's 2nd law (the time rate of change of momentum of the fluid particles within this stream tube slice must equal to the forces acting on it).

$$F = \text{mass} * \text{acceleration}$$

Consider a small element of the flowing fluid as shown below, Let

dA : cross-sectional area of the fluid element,
 dL : Length of the fluid element,
 dW : Weight of the fluid element,
 u : Velocity of the fluid element,
 P : Pressure of the fluid element.

Assuming that the fluid is steady, non-viscous (the frictional losses are zero) and incompressible (the density of fluid is constant).

The forces on the cylindrical fluid element are,
 Pressure force acting on the direction of flow (PdA).
 Pressure force acting on the opposite direction of flow $[(P+dP)dA]$.

A component of gravity force acting on the opposite direction of flow ($dW \sin \theta$).

Hence, Total force = gravity force + pressure force

The pressure force in the direction of flow

$$F_p = PdA - (P+dP) dA = -dPdA \quad (5)$$

The gravity force in the direction of flow

$$\begin{aligned} F_g &= -dW \sin \theta \{W = mg = \rho dA dL g\} \\ &= -\rho g dA dL \sin \theta \{ \sin \theta = dz / dL \} \\ &= -\rho g dA dz. \end{aligned} \quad (6)$$

The net force in the direction of flow

$$\begin{aligned} F &= ma \{m = \rho dA dL\} \\ &= \rho dA dL a \\ &= \rho dA u du. \end{aligned} \quad (7)$$

We have

$$\begin{aligned} \rho dA u du &= -dP dA - \rho g dA dz \{ \div \rho dA \} \\ dP / \rho + u du + dz g &= 0 \text{ ----- Euler's equation of motion.} \end{aligned}$$

Bernoulli's equation could be obtain by integration the Euler's equation.

$$\int dP / \rho + \int u du + \int dz g = \text{constant.}$$

$$P / \rho + u^2 / 2 + z g = \text{constant.}$$

$$\Delta P / \rho + \Delta u^2 / 2 + \Delta z g = 0 \text{ -- Bernoulli's equation.}$$

4. RESULTS.

4.1. Results of First Model.

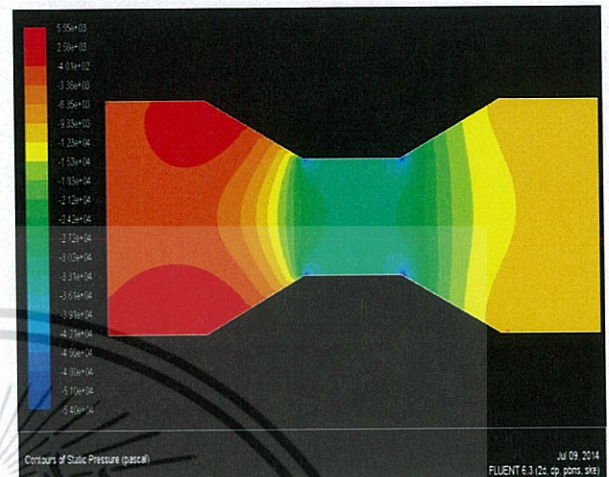


Fig-4.1.1: Pressure contours.

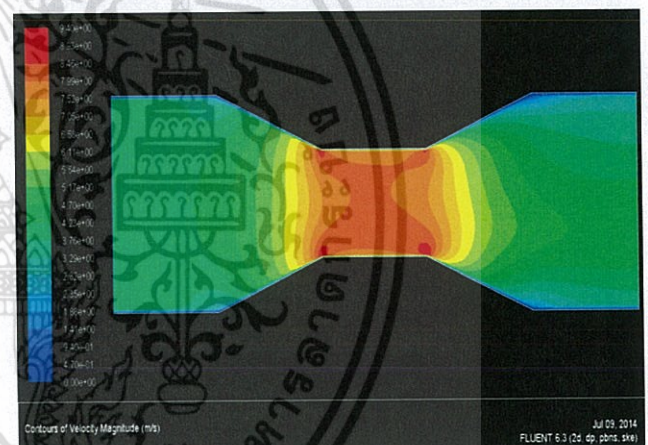


Fig-4.1.2: Velocity contours.

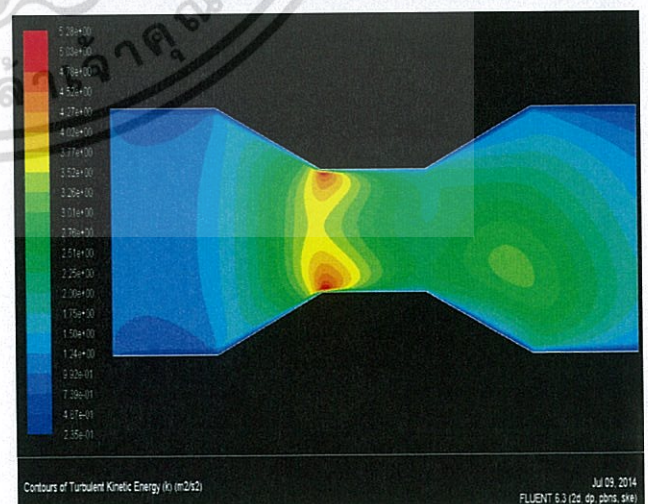


Fig-4.1.3: Turbulence contours.

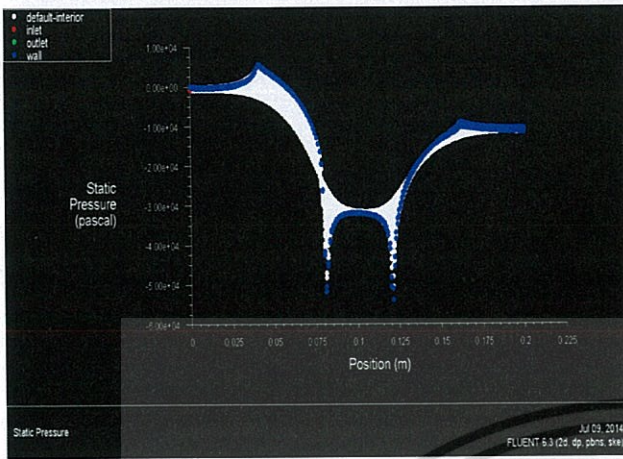


Chart-4.1.1: Static Pressure-Position.

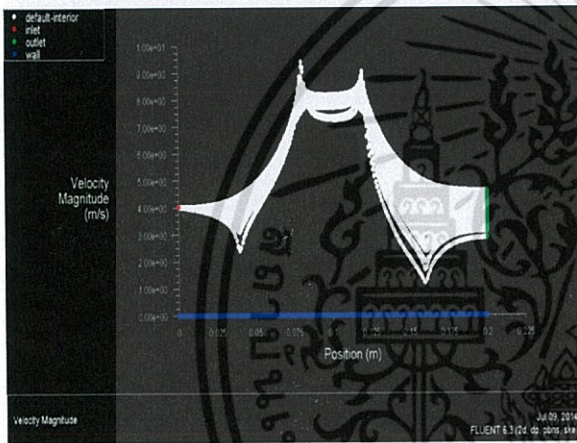


Chart-4.1.2: Velocity-Position.

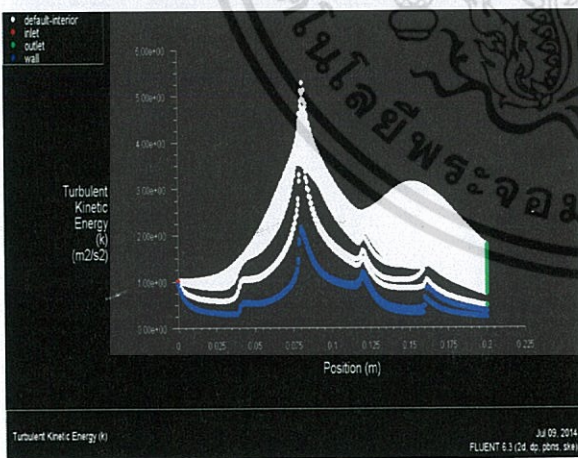


Chart-4.1.3: Turbulent-Position.

Table-4.1.1: Results of flow analysis.

s.no	parameters	Min.	Max.
1	Pressure(Pascal)	-53977.21	5552.164
2	Velocity(m/s)	0	9.4006
3	Turbulent(m ² /s ²)	0.2347	5.28177

Table-4.1.2: Results of mass flow rate.

Mass Flow Rate	(kg/s)
Interior	-48874.855
Inlet	239.56801
Outlet	-239.56801
Wall	0

4.2. Results of Second Model.



Fig-4.2.1: Pressure contours.

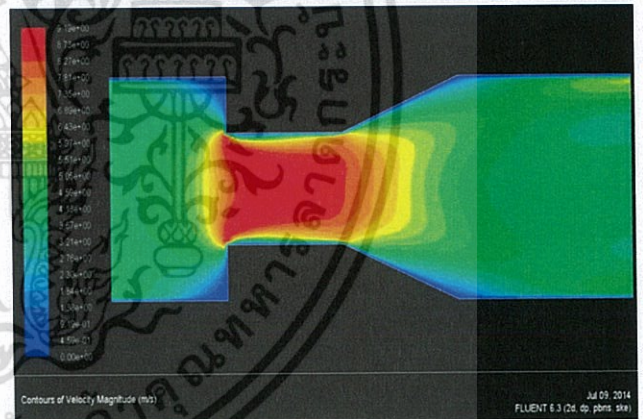


Fig-4.2.2: Velocity contours.

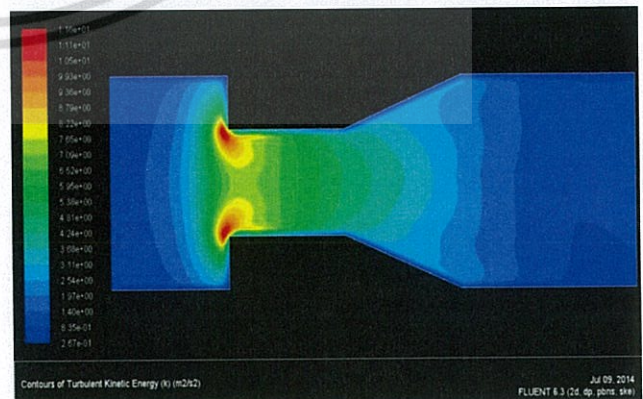


Fig-4.2.3: Turbulence contours.

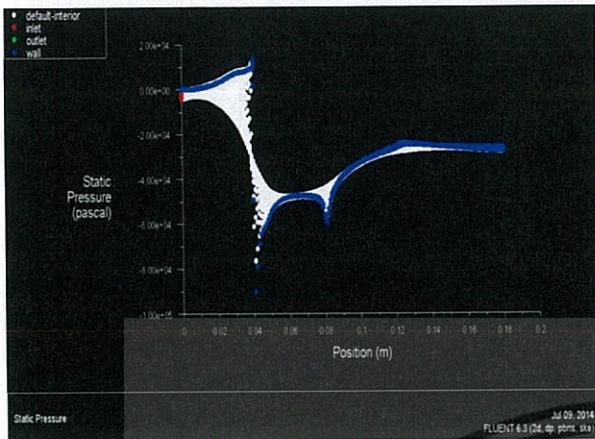


Chart-4.2.1: Static Pressure-Position.

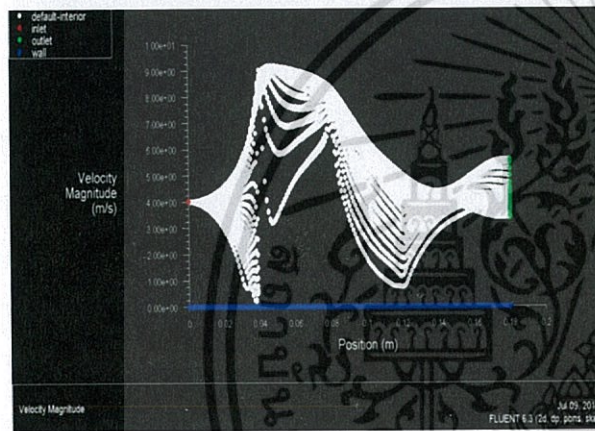


Chart-4.2.2: Velocity-Position.

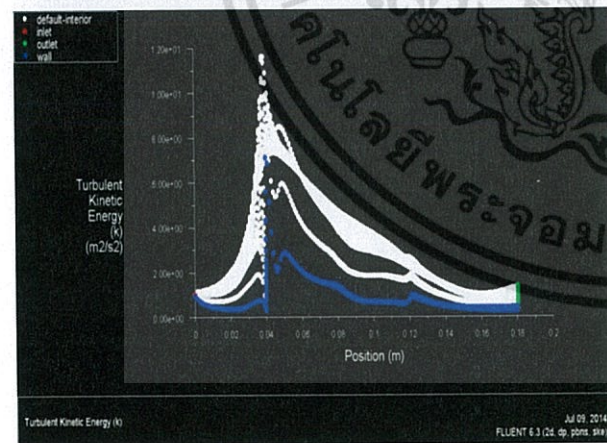


Chart-4.2.3: Turbulent-Position.

Table-4.2.1: Results of flow analysis.

s.no	parameters	Min.	Max.
1	Pressure(Pascal)	-90194.45	13095.87
2	Velocity(m/s)	0	9.185
3	Turbulent(m2/s2)	0.2672125	11.630932

Table-4.2.2: Results of mass flow rate.

Mass Flow Rate	(kg/s)
Interior	1027.7252
Inlet	239.56801
Outlet	-239.56801
Wall	0

4.3. Results of Third Model.

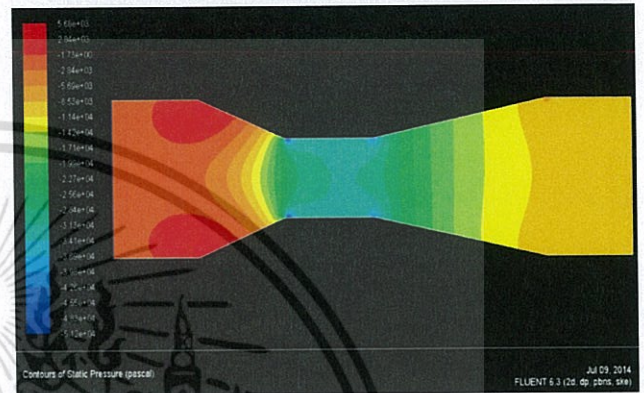


Fig-4.3.1: Pressure contours.

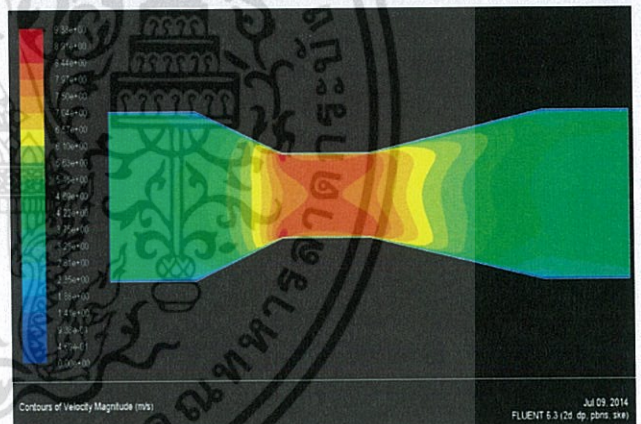


Fig-4.3.2: Velocity contours.

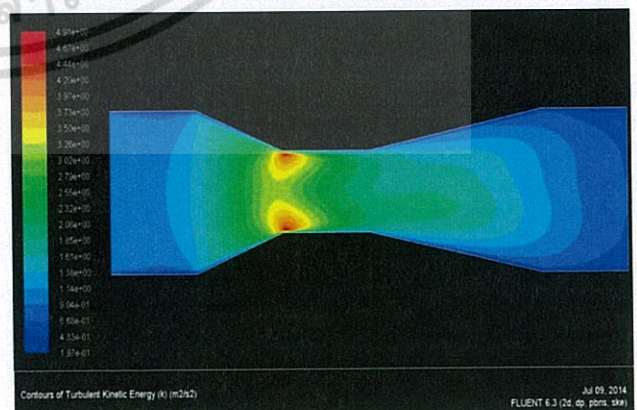


Fig-4.3.3: Turbulence contours.

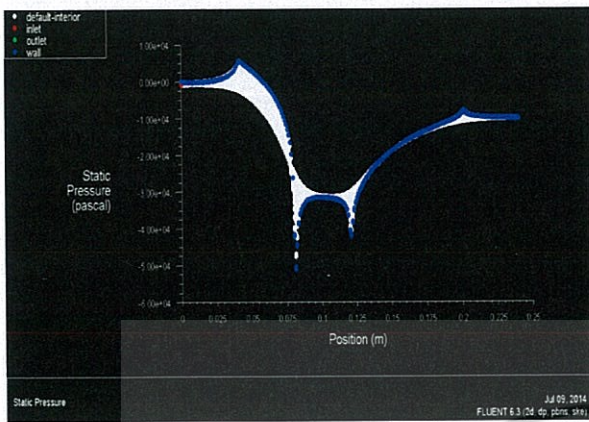


Chart-4.3.1: Static Pressure-Position.

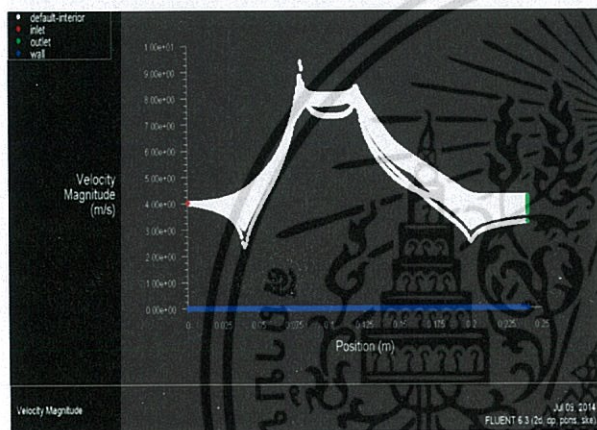


Chart-4.3.2: Velocity-Position.

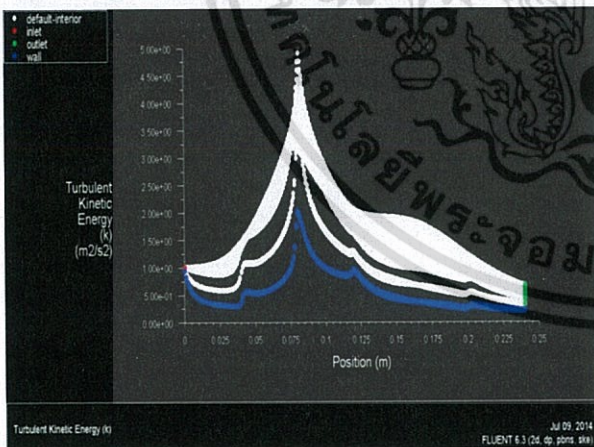


Chart-4.3.3: Turbulent-Position.

Table-4.3.1: Results of flow analysis.

s.no	parameters	Min.	Max.
1	Pressure(Pascal)	-51152.82	5681.665
2	Velocity(m/s)	0	9.38077
3	Turbulent(m2/s2)	0.1972782	4.908975

Table-4.3.2: Results of mass flow rate.

Mass Flow Rate	(kg/s)
Interior	-58327.486
Inlet	239.56801
Outlet	-239.56801
Wall	0

4.4. Results of Forth Model.

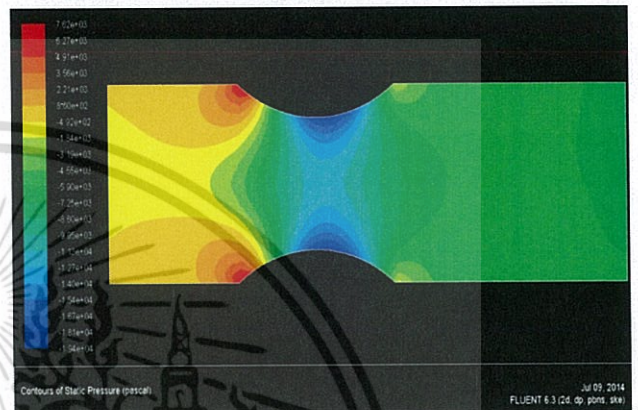


Fig-4.4.1: Pressure contours.

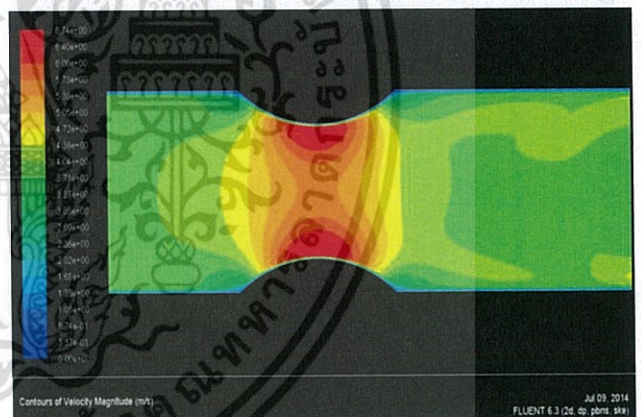


Fig-4.4.2: Velocity contours.

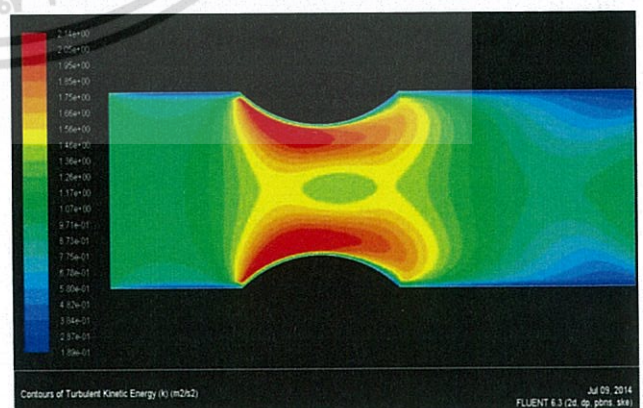


Fig-4.4.3: Turbulence contours.

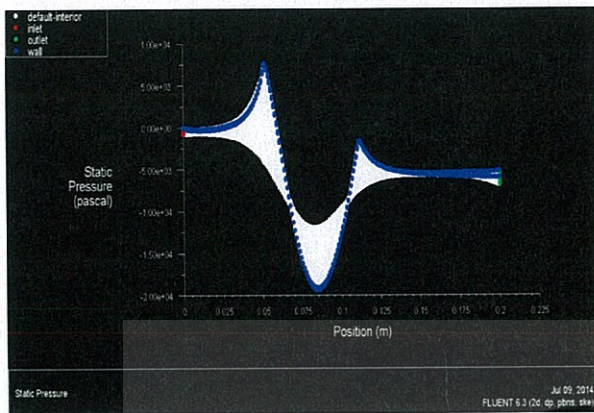


Chart-4.4.1: Static Pressure-Position.

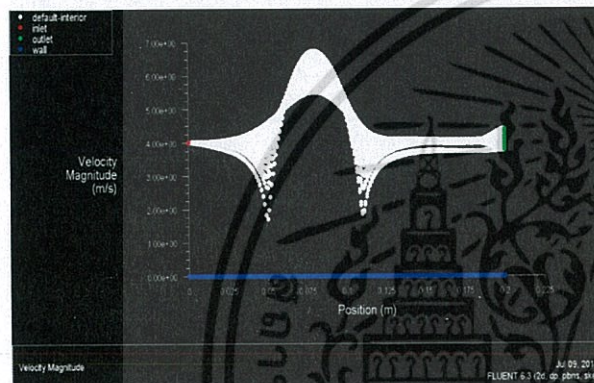


Chart-4.4.2: Velocity-Position.

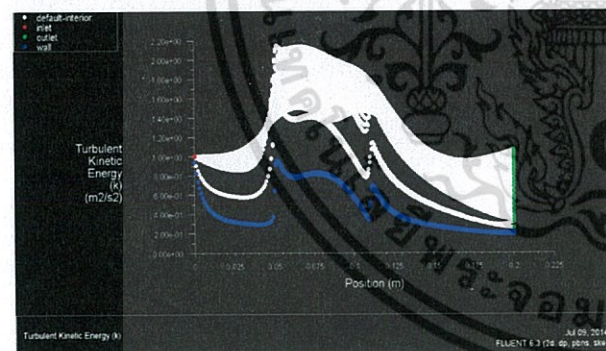


Chart-4.4.3: Turbulent-Position.

Table-4.4.1: Results of flow analysis.

s.no	parameters	Min.	Max.
1	Pressure(Pascal)	-19414.05	7617.83
2	Velocity(m/s)	0	6.73726
3	Turbulent(m ² /s ²)	0.1887413	2.143962

Table-4.4.2: Results of mass flow rate.

Mass Flow Rate	(kg/s)
Interior	-48615.779
Inlet	239.56801
Outlet	-239.56801
Wall	0

5. CONCLUSIONS

The flow through venturi meter was numerically simulated with water by steady flow in k-epsilon scheme. The major observations made related to the pressure, turbulence, velocity contours and mass flow rate in the process of flow. The accuracy of results is with in 5%. The velocity and pressure distributions are discribed brifly and graphs are plotted.

To conclude, this examination results indicate that FLUENT can be used with high degree of accuracy to visualize the various contours of velocity, pressure and turbulence can be understand clearly, the relationship between the mass flow rate and pressure drop for each flow meter is done and pressure recovery is better in the venturimeter.

REFERENCES

- [1]. Anderson, J. D. (1995). Computational fluid dynamics: The basics with applications (6th Ed.). New York, NY: Mcgraw Hill, Inc.
- [2]. Versteeg, H.K. & Malalasekera, W. (2007). An Introduction to Computational fluid dynamics: The Finite Volume Method (2nd Ed), New Jersey: Pearson education ltd
- [3]. Cengel, Y. A. & Cimbala J. M. (2010). Fluid Mechanics: Fundamentals and applications (2nd Ed), Noida, UP, India: Tata McGraw-Hill Education.
- [4]. Sapra, M.K., Bajaj, M., Kundu, S.N., Sharma, B.S.V.G. (2011). Experimental and CFD investigation of 100 mm size cone flow elements. Flow Measurement and Instrumentation, 22, 469–474.
- [5]. Singh, R.K., Singh, S.N., Seshadri, V. (2009). Study on the effect of vertex angle and upstream swirl on the performance characteristics of cone flowmeter using CFD. Flow Measurement and Instrumentation, 20, 69–74.
- [6]. Hojat Ghassemi, Hamidreza Farshi Fasih (2011). Application of small size cavitating venturi as flow controller and flow meter. Flow Measurement and Instrumentation, 22, 406–412.
- [7]. Denghui He, Bofeng Bai (2012). Numerical investigation of wet gas flow in Venturi meter. Flow Measurement and Instrumentation, 28, 1–6.
- [8]. Singh, Rajesh Kumar, Singh, S.N., Seshadri V. (2010). CFD prediction of the effects of the upstream elbow fittings on the performance of cone flowmeters. Flow Measurement and Instrumentation, 21, 88–97.
- [9]. Reader-Harris, M.J., Brunton, W.C., Gibson, J.J., Hodges, D., Nicholson, I.G. (2001). Discharge coefficients of Venturi tubes with standard and non-standard convergent angles. Flow Measurement and Instrumentation, 12, 135–145.
- [10]. Hall, G.W. Application of Boundary Layer Theory to Explain some Nozzle and Venturi Peculiarities Trans. IME, London Vol. 173 No.36 1959.

BIOGRAPHIES:

P.Hari Vijay completed schooling from Geetanjali public school, East Godavari district with 68% marks. Completed B.Tech degree from Aarupadai veedu institute of technology with 60%. Now pursuing M.Tech from Kakinada Institute of Technology and Science, Tirupathi(V), Divili, East Godavari Dist., A.P., India.



Mr. V.Subrahmanyam working as Assoc. Professor and Head of Mechanical Engineering Department in KITS-Divili Engineering college, Andhra Pradesh, India. He has 15 years of teaching experience in various reputed engineering colleges. He guided so many B.Tech and M.Tech projects. He has three publications in reputed international journals. He is doing research in Nano-Technology and Thermal Engineering



Flow control valve



ASC Series



Specification

Model	ASC100-06	ASC200-08	ASC300-10	ASC300-15
Fluid	Air (to be filtered by 40 μm filter element)			
Port size ①	1/8"	1/4"	3/8"	1/2"
Pressure range	0.05~0.95MPa(7~135psi)			
Proof pressure	1.5MPa(215psi)			
Temperature	-20~70°C			
Material body	Aluminum alloy			
Flow (L/min)	Control flow	200	450	1250
	Free flow	400	800	1500
		200	450	1250
		400	800	1500

① PT thread, G thread and NPT thread are available.

Ordering code

ASC 300 10

Model	ASC: Flow control valve
Code	100: 100 series 200: 200 series 300: 300 series
Thread type	Blank: PT G: G T: NPT
Port size	Model Port size 100 series 06: 1/8" 200 series 08: 1/4" 300 series 10: 3/8" 15: 1/2"

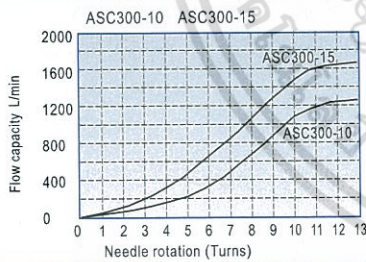
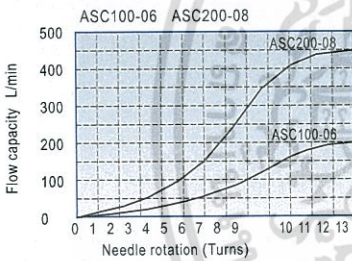
Symbol



Product feature

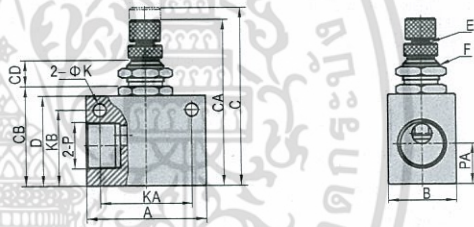
1. Small and compact structure.
2. Allows air to exhaust and cut off air flow. The adjustment screw is both sensitive and precise..
3. Can be mounted in various position to facilitate installation and application.

Flow chart

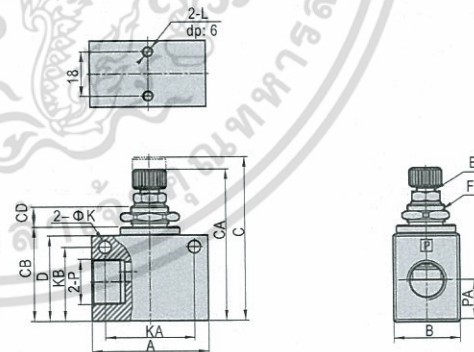


Dimensions

ASC100, 200



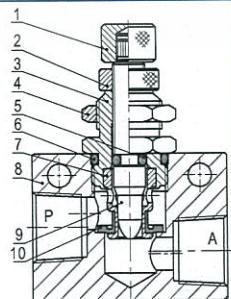
ASC300



Type\Item	A	B	C	CA	CB	CD	D	E	F	K	KA	KB	L	P	PA
ASC10006	32	18	52.5	47	26	8.6	23	M6×0.5	M12×0.75	4.3	22	18	M4×0.7	1/8"	10
ASC20008	36	18	56.5	51	30	8.6	27	M6×0.5	M12×0.75	4.3	26	23	M4×0.7	1/4"	13.5
ASC30010	50	28	74	65	40.5	10	37	M8×0.75	M16×1.0	5.3	35	32	M4×0.7	3/8"	17.5
ASC30015	50	28	74	65	40.5	10	37	M8×0.75	M16×1.0	5.3	35	32	M4×0.7	1/2"	17.5

Inner structure

No.	Item
1	Adjustment cap
2	Clamping cap
3	Throttle body
4	Hexagon nut
5	O-ring
6	O-ring
7	Throttle sheath
8	Body
9	Throttle column
10	Spool O-ring



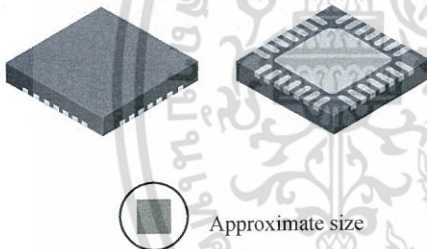
DMOS Microstepping Driver with Translator And Overcurrent Protection

Features and Benefits

- Low $R_{DS(ON)}$ outputs
- Automatic current decay mode detection/selection
- Mixed and Slow current decay modes
- Synchronous rectification for low power dissipation
- Internal UVLO
- Crossover-current protection
- 3.3 and 5 V compatible logic supply
- Thermal shutdown circuitry
- Short-to-ground protection
- Shorted load protection
- Five selectable step modes: full, $1/2$, $1/4$, $1/8$, and $1/16$

Package:

28-contact QFN
with exposed thermal pad
5 mm × 5 mm × 0.90 mm
(ET package)



Description

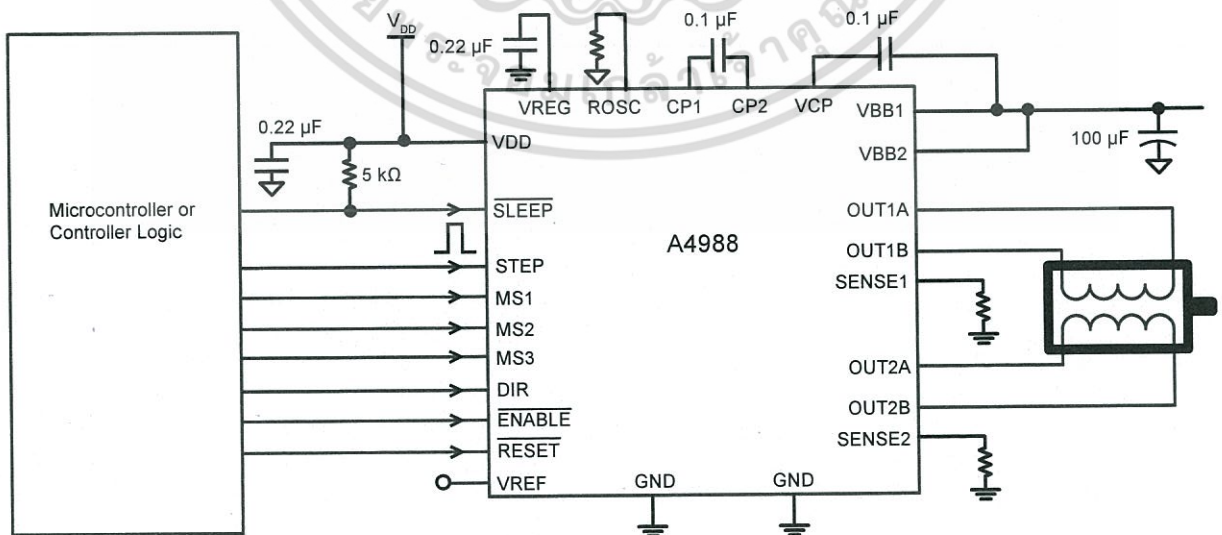
The A4988 is a complete microstepping motor driver with built-in translator for easy operation. It is designed to operate bipolar stepper motors in full-, half-, quarter-, eighth-, and sixteenth-step modes, with an output drive capacity of up to 35 V and ± 2 A. The A4988 includes a fixed off-time current regulator which has the ability to operate in Slow or Mixed decay modes.

The translator is the key to the easy implementation of the A4988. Simply inputting one pulse on the STEP input drives the motor one microstep. There are no phase sequence tables, high frequency control lines, or complex interfaces to program. The A4988 interface is an ideal fit for applications where a complex microprocessor is unavailable or is overburdened.

During stepping operation, the chopping control in the A4988 automatically selects the current decay mode, Slow or Mixed. In Mixed decay mode, the device is set initially to a fast decay for a proportion of the fixed off-time, then to a slow decay for the remainder of the off-time. Mixed decay current control results in reduced audible motor noise, increased step accuracy, and reduced power dissipation.

Continued on the next page...

Typical Application Diagram



A4988

DMOS Microstepping Driver with Translator And Overcurrent Protection

Description (continued)

Internal synchronous rectification control circuitry is provided to improve power dissipation during PWM operation. Internal circuit protection includes: thermal shutdown with hysteresis, undervoltage lockout (UVLO), and crossover-current protection. Special power-on sequencing is not required.

The A4988 is supplied in a surface mount QFN package (ES), 5 mm × 5 mm, with a nominal overall package height of 0.90 mm and an exposed pad for enhanced thermal dissipation. It is lead (Pb) free (suffix -T), with 100% matte tin plated leadframes.

Selection Guide

Part Number	Package	Packing
A4988SETTR-T	28-contact QFN with exposed thermal pad	1500 pieces per 7-in. reel

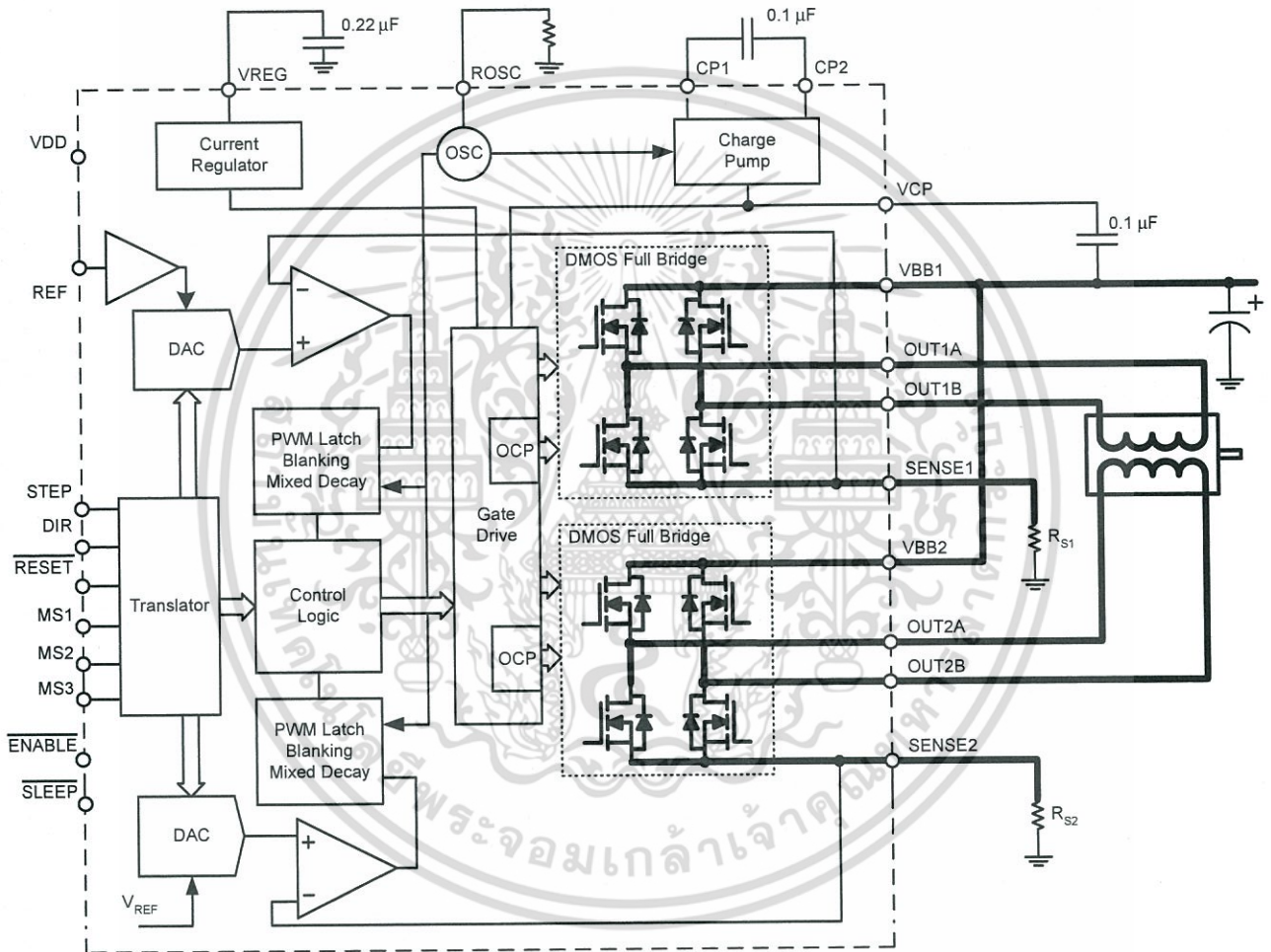
Absolute Maximum Ratings

Characteristic	Symbol	Notes	Rating	Units
Load Supply Voltage	V_{BB}		35	V
Output Current	I_{OUT}		±2	A
Logic Input Voltage	V_{IN}		-0.3 to 5.5	V
Logic Supply Voltage	V_{DD}		-0.3 to 5.5	V
Motor Outputs Voltage			-2.0 to 37	V
Sense Voltage	V_{SENSE}		-0.5 to 0.5	V
Reference Voltage	V_{REF}		5.5	V
Operating Ambient Temperature	T_A	Range S	-20 to 85	°C
Maximum Junction	$T_J(max)$		150	°C
Storage Temperature	T_{stg}		-55 to 150	°C



Allegro MicroSystems, LLC
115 Northeast Cutoff
Worcester, Massachusetts 01615-0036 U.S.A.
1.508.853.5000; www.allegromicro.com

Functional Block Diagram



A4988

DMOS Microstepping Driver with Translator And Overcurrent Protection

ELECTRICAL CHARACTERISTICS¹ at T_A = 25°C, V_{BB} = 35 V (unless otherwise noted)

Characteristics	Symbol	Test Conditions	Min.	Typ. ²	Max.	Units
Output Drivers						
Load Supply Voltage Range	V _{BB}	Operating	8	–	35	V
Logic Supply Voltage Range	V _{DD}	Operating	3.0	–	5.5	V
Output On Resistance	R _{DSON}	Source Driver, I _{OUT} = –1.5 A	–	320	430	mΩ
		Sink Driver, I _{OUT} = 1.5 A	–	320	430	mΩ
Body Diode Forward Voltage	V _F	Source Diode, I _F = –1.5 A	–	–	1.2	V
		Sink Diode, I _F = 1.5 A	–	–	1.2	V
Motor Supply Current	I _{BB}	f _{PWM} < 50 kHz	–	–	4	mA
		Operating, outputs disabled	–	–	2	mA
Logic Supply Current	I _{DD}	f _{PWM} < 50 kHz	–	–	8	mA
		Outputs off	–	–	5	mA
Control Logic						
Logic Input Voltage	V _{IN(1)}		V _{DD} × 0.7	–	–	V
	V _{IN(0)}		–	–	V _{DD} × 0.3	V
Logic Input Current	I _{IN(1)}	V _{IN} = V _{DD} × 0.7	–20	<1.0	20	μA
	I _{IN(0)}	V _{IN} = V _{DD} × 0.3	–20	<1.0	20	μA
Microstep Select	R _{MS1}	MS1 pin	–	100	–	kΩ
	R _{MS2}	MS2 pin	–	50	–	kΩ
	R _{MS3}	MS3 pin	–	100	–	kΩ
Logic Input Hysteresis	V _{HYS(IN)}	As a % of V _{DD}	5	11	19	%
Blank Time	t _{BLANK}		0.7	1	1.3	μs
Fixed Off-Time	t _{OFF}	OSC = V _{DD} or GND	20	30	40	μs
		R _{OSC} = 25 kΩ	23	30	37	μs
Reference Input Voltage Range	V _{REF}		0	–	4	V
Reference Input Current	I _{REF}		–3	0	3	μA
Current Trip-Level Error ³	err _I	V _{REF} = 2 V, %I _{TRIPMAX} = 38.27%	–	–	±15	%
		V _{REF} = 2 V, %I _{TRIPMAX} = 70.71%	–	–	±5	%
		V _{REF} = 2 V, %I _{TRIPMAX} = 100.00%	–	–	±5	%
Crossover Dead Time	t _{DT}		100	475	800	ns
Protection						
Overcurrent Protection Threshold ⁴	I _{OCPST}		2.1	–	–	A
Thermal Shutdown Temperature	T _{TSD}		–	165	–	°C
Thermal Shutdown Hysteresis	T _{TSDHYS}		–	15	–	°C
VDD Undervoltage Lockout	V _{DDUVLO}	V _{DD} rising	2.7	2.8	2.9	V
VDD Undervoltage Hysteresis	V _{DDUVLOHYS}		–	90	–	mV

¹For input and output current specifications, negative current is defined as coming out of (sourcing) the specified device pin.

²Typical data are for initial design estimations only, and assume optimum manufacturing and application conditions. Performance may vary for individual units, within the specified maximum and minimum limits.

³V_{ERR} = [(V_{REF}/8) – V_{SENSE}] / (V_{REF}/8).

⁴Overcurrent protection (OCP) is tested at T_A = 25°C in a restricted range and guaranteed by characterization.



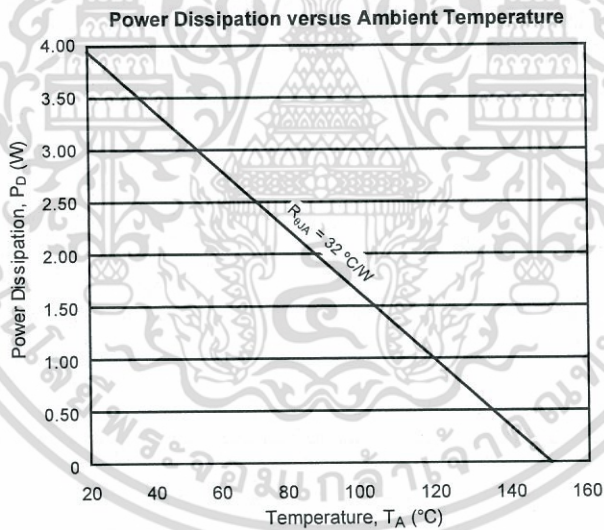
Allegro MicroSystems, LLC
115 Northeast Cutoff
Worcester, Massachusetts 01615-0036 U.S.A.
1.508.853.5000; www.allegromicro.com

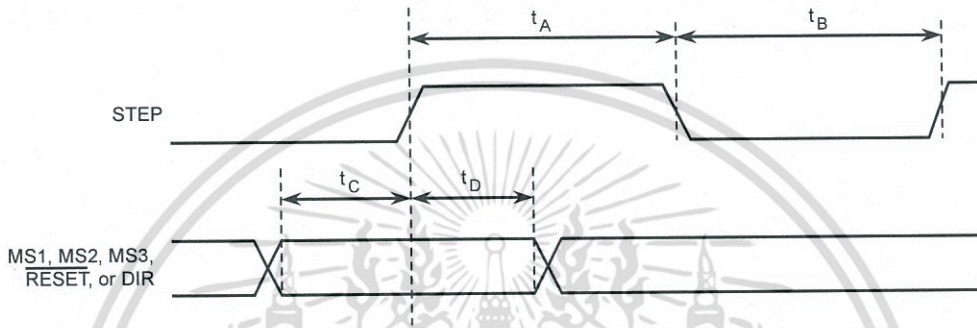
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

THERMAL CHARACTERISTICS

Characteristic	Symbol	Test Conditions*	Value	Units
Package Thermal Resistance	$R_{\theta JA}$	Four-layer PCB, based on JEDEC standard	32	$^{\circ}C/W$

*Additional thermal information available on Allegro Web site.





Time Duration	Symbol	Typ.	Unit
STEP minimum, HIGH pulse width	t_A	1	μs
STEP minimum, LOW pulse width	t_B	1	μs
Setup time, input change to STEP	t_C	200	ns
Hold time, input change to STEP	t_D	200	ns

Figure 1: Logic Interface Timing Diagram

Table 1: Microstepping Resolution Truth Table

MS1	MS2	MS3	Microstep Resolution	Excitation Mode
L	L	L	Full Step	2 Phase
H	L	L	Half Step	1-2 Phase
L	H	L	Quarter Step	W1-2 Phase
H	H	L	Eighth Step	2W1-2 Phase
H	H	H	Sixteenth Step	4W1-2 Phase

Functional Description

Device Operation. The A4988 is a complete microstepping motor driver with a built-in translator for easy operation with minimal control lines. It is designed to operate bipolar stepper motors in full-, half-, quarter-, eighth-, and sixteenth-step modes. The currents in each of the two output full-bridges and all of the N-channel DMOS FETs are regulated with fixed off-time PWM (pulse width modulated) control circuitry. At each step, the current for each full-bridge is set by the value of its external current-sense resistor (R_{S1} and R_{S2}), a reference voltage (V_{REF}), and the output voltage of its DAC (which in turn is controlled by the output of the translator).

At power-on or reset, the translator sets the DACs and the phase current polarity to the initial Home state (shown in Figures 9 through 13), and the current regulator to Mixed Decay Mode for both phases. When a step command signal occurs on the STEP input, the translator automatically sequences the DACs to the next level and current polarity. (See Table 2 for the current-level sequence.) The microstep resolution is set by the combined effect of the MSx inputs, as shown in Table 1.

When stepping, if the new output levels of the DACs are lower than their previous output levels, then the decay mode for the active full-bridge is set to Mixed. If the new output levels of the DACs are higher than or equal to their previous levels, then the decay mode for the active full-bridge is set to Slow. This automatic current decay selection improves microstepping performance by reducing the distortion of the current waveform that results from the back EMF of the motor.

Microstep Select (MSx). The microstep resolution is set by the voltage on logic inputs MSx, as shown in Table 1. The MS1 and MS3 pins have a 100 k Ω pull-down resistance, and the MS2 pin has a 50 k Ω pull-down resistance. When changing the step mode the change does not take effect until the next STEP rising edge.

If the step mode is changed without a translator reset, and absolute position must be maintained, it is important to change the step mode at a step position that is common to both step modes in order to avoid missing steps. When the device is powered down, or reset due to TSD or an over current event the translator is set to

the home position which is by default common to all step modes.

Mixed Decay Operation. The bridge operates in Mixed decay mode, at power-on and reset, and during normal running according to the ROSC configuration and the step sequence, as shown in Figures 9 through 13. During Mixed decay, when the trip point is reached, the A4988 initially goes into a fast decay mode for 31.25% of the off-time, t_{OFF} . After that, it switches to Slow decay mode for the remainder of t_{OFF} . A timing diagram for this feature appears on the next page.

Typically, mixed decay is only necessary when the current in the winding is going from a higher value to a lower value as determined by the state of the translator. For most loads automatically-selected mixed decay is convenient because it minimizes ripple when the current is rising and prevents missed steps when the current is falling. For some applications where microstepping at very low speeds is necessary, the lack of back EMF in the winding causes the current to increase in the load quickly, resulting in missed steps. This is shown in Figure 2. By pulling the ROSC pin to ground, mixed decay is set to be active 100% of the time, for both rising and falling currents, and prevents missed steps as shown in Figure 3. If this is not an issue, it is recommended that automatically-selected mixed decay be used, because it will produce reduced ripple currents. Refer to the Fixed Off-Time section for details.

Low Current Microstepping. Intended for applications where the minimum on-time prevents the output current from regulating to the programmed current level at low current steps. To prevent this, the device can be set to operate in Mixed decay mode on both rising and falling portions of the current waveform. This feature is implemented by shorting the ROSC pin to ground. In this state, the off-time is internally set to 30 μ s.

Reset Input (\overline{RESET}). The \overline{RESET} input sets the translator to a predefined Home state (shown in Figures 9 through 13), and turns off all of the FET outputs. All STEP inputs are ignored until the \overline{RESET} input is set to high.

Step Input (STEP). A low-to-high transition on the STEP



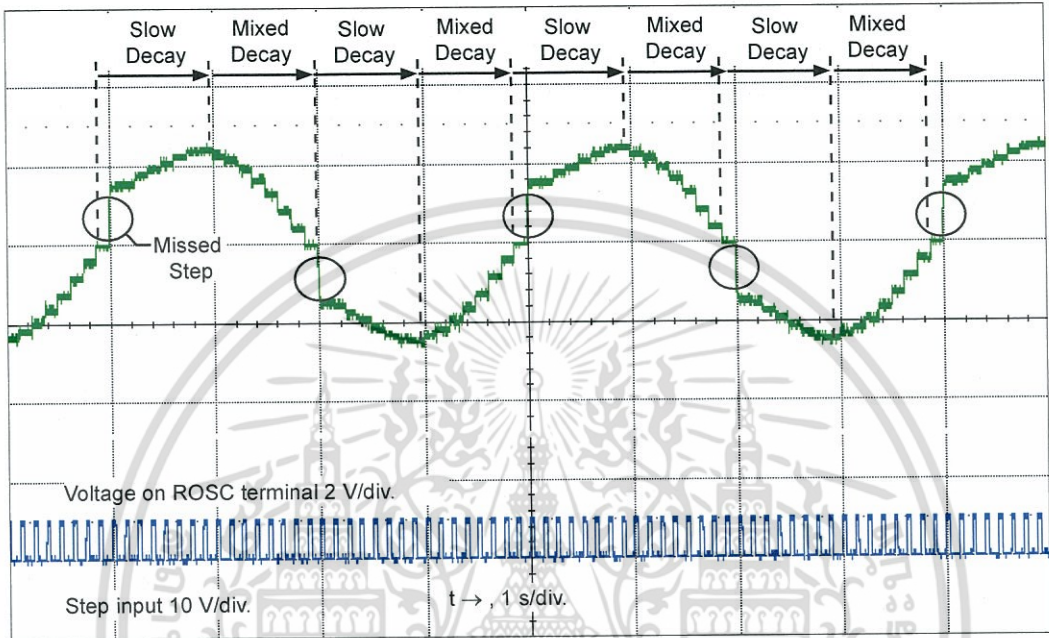


Figure 2: Missed Steps in Low-Speed Microstepping

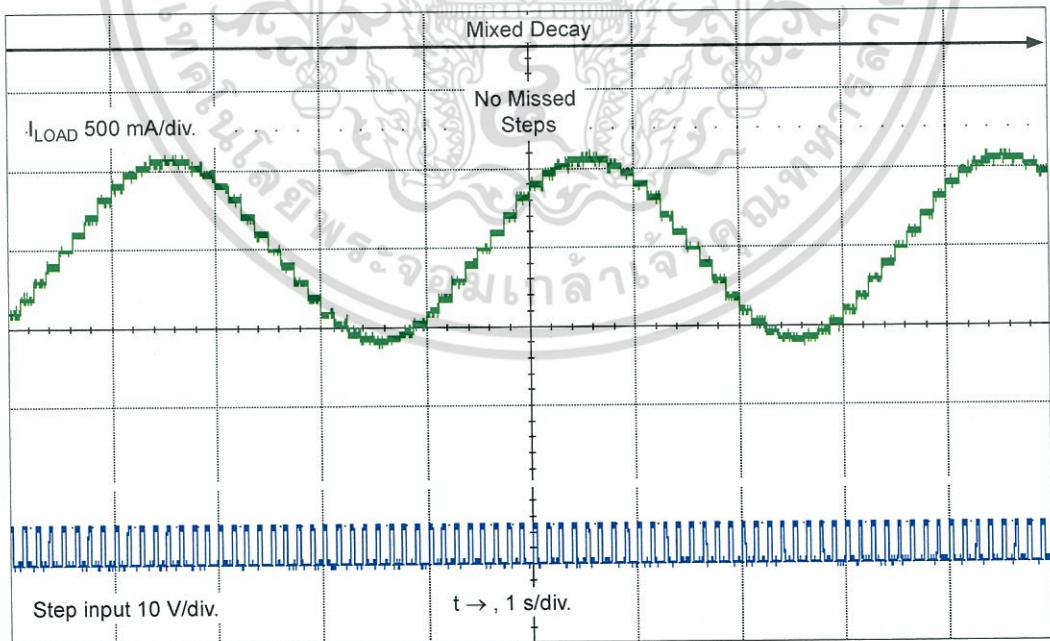


Figure 3: Continuous Stepping Using Automatically-Selected Mixed Stepping (ROSC pin grounded)



Allegro MicroSystems, LLC
115 Northeast Cutoff
Worcester, Massachusetts 01615-0036 U.S.A.
1.508.853.5000; www.allegromicro.com

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

input sequences the translator and advances the motor one increment. The translator controls the input to the DACs and the direction of current flow in each winding. The size of the increment is determined by the combined state of the MSx inputs.

Direction Input (DIR). This determines the direction of rotation of the motor. Changes to this input do not take effect until the next STEP rising edge.

Internal PWM Current Control. Each full-bridge is controlled by a fixed off-time PWM current control circuit that limits the load current to a desired value, I_{TRIP} . Initially, a diagonal pair of source and sink FET outputs are enabled and current flows through the motor winding and the current sense resistor, R_{Sx} . When the voltage across R_{Sx} equals the DAC output voltage, the current sense comparator resets the PWM latch. The latch then turns off the appropriate source driver and initiates a fixed off time decay mode

The maximum value of current limiting is set by the selection of R_{Sx} and the voltage at the VREF pin. The transconductance function is approximated by the maximum value of current limiting, $I_{TRIPMAX}$ (A), which is set by

$$I_{TRIPMAX} = V_{REF} / (8 \times R_S)$$

where R_S is the resistance of the sense resistor (Ω) and V_{REF} is the input voltage on the REF pin (V).

The DAC output reduces the V_{REF} output to the current sense comparator in precise steps, such that

$$I_{TRIP} = (\%I_{TRIPMAX} / 100) \times I_{TRIPMAX}$$

(See Table 2 for $\%I_{TRIPMAX}$ at each step.)

It is critical that the maximum rating (0.5 V) on the SENSE1 and SENSE2 pins is not exceeded.

Fixed Off-Time. The internal PWM current control circuitry uses a one-shot circuit to control the duration of time that the DMOS FETs remain off. The off-time, t_{OFF} , is determined by the ROSC terminal. The ROSC terminal has three settings:

- ROSC tied to VDD — off-time internally set to 30 μ s, decay mode is automatic Mixed decay except when in full step where decay mode is set to Slow decay
- ROSC tied directly to ground — off-time internally set to 30 μ s, current decay is set to Mixed decay for both increasing and decreasing currents for all step modes.

- ROSC through a resistor to ground — off-time is determined by the following formula, the decay mode is automatic Mixed decay for all step modes except full step which is set to slow decay.

$$t_{OFF} \approx R_{OSC} / 825$$

Where t_{OFF} is in μ s.

Blanking. This function blanks the output of the current sense comparators when the outputs are switched by the internal current control circuitry. The comparator outputs are blanked to prevent false overcurrent detection due to reverse recovery currents of the clamp diodes, and switching transients related to the capacitance of the load. The blank time, t_{BLANK} (μ s), is approximately

$$t_{BLANK} \approx 1 \mu s$$

Shorted-Load and Short-to-Ground Protection.

If the motor leads are shorted together, or if one of the leads is shorted to ground, the driver will protect itself by sensing the overcurrent event and disabling the driver that is shorted, protecting the device from damage. In the case of a short-to-ground, the device will remain disabled (latched) until the SLEEP input goes high or VDD power is removed. A short-to-ground overcurrent event is shown in Figure 4.

When the two outputs are shorted together, the current path is through the sense resistor. After the blanking time ($\approx 1 \mu$ s) expires, the sense resistor voltage is exceeding its trip value, due to the overcurrent condition that exists. This causes the driver to go into a fixed off-time cycle. After the fixed off-time expires the driver turns on again and the process repeats. In this condition the driver is completely protected against overcurrent events, but the short is repetitive with a period equal to the fixed off-time of the driver. This condition is shown in Figure 5.

During a shorted load event it is normal to observe both a positive and negative current spike as shown in Figure 3, due to the direction change implemented by the Mixed decay feature. This is shown in Figure 6. In both instances the overcurrent circuitry is protecting the driver and prevents damage to the device.

Charge Pump (CP1 and CP2). The charge pump is used to generate a gate supply greater than that of VBB for driving the source-side FET gates. A 0.1 μ F ceramic capacitor, should be connected between CP1 and CP2. In addition, a 0.1 μ F ceramic capacitor is required between VCP and VBB, to act as a reservoir for operating the high-side FET gates.

Capacitor values should be Class 2 dielectric $\pm 15\%$ maximum, or tolerance R, according to EIA (Electronic Industries Alliance) specifications.



V_{REG} (VREG). This internally-generated voltage is used to operate the sink-side FET outputs. The nominal output voltage of the VREG terminal is 7 V. The VREG pin must be decoupled with a 0.22 μ F ceramic capacitor to ground. V_{REG} is internally monitored. In the case of a fault condition, the FET outputs of the A4988 are disabled.

Capacitor values should be Class 2 dielectric \pm 15% maximum, or tolerance R, according to EIA (Electronic Industries Alliance) specifications.

Enable Input ($\overline{\text{ENABLE}}$). This input turns on or off all of the FET outputs. When set to a logic high, the outputs are disabled. When set to a logic low, the internal control enables the outputs as required. The translator inputs STEP, DIR, and MSx, as well as the internal sequencing logic, all remain active, independent of the $\overline{\text{ENABLE}}$ input state.

Shutdown. In the event of a fault, overtemperature (excess T_j) or an undervoltage (on VCP), the FET outputs of the A4988 are disabled until the fault condition is removed. At power-on, the UVLO (undervoltage lockout) circuit disables the FET outputs and resets the translator to the Home state.

Sleep Mode ($\overline{\text{SLEEP}}$). To minimize power consumption when the motor is not in use, this input disables much of the internal circuitry including the output FETs, current regulator, and charge pump. A logic low on the SLEEP pin puts the A4988 into Sleep mode. A logic high allows normal operation, as well as start-up (at which time the A4988 drives the motor to the Home microstep position). When emerging from Sleep mode, in order to allow the charge pump to stabilize, provide a delay of 1 ms before issuing a Step command.

Mixed Decay Operation. The bridge operates in Mixed Decay mode, depending on the step sequence, as shown in Figures 9 through 13. As the trip point is reached, the A4988 initially goes into a fast decay mode for 31.25% of the off-time, t_{OFF}. After that, it switches to Slow Decay mode for the remainder of t_{OFF}. A timing diagram for this feature appears in Figure 7.

Synchronous Rectification. When a PWM-off cycle is triggered by an internal fixed-off time cycle, load current recirculates according to the decay mode selected by the control logic. This synchronous rectification feature turns on the appropriate FETs during current decay, and effectively shorts out the body diodes with the low FET R_{DS(ON)}. This reduces power dissipation significantly, and can eliminate the need for external Schottky diodes in many applications. Synchronous rectification turns off when the load current approaches zero (0 A), preventing reversal of the load current.

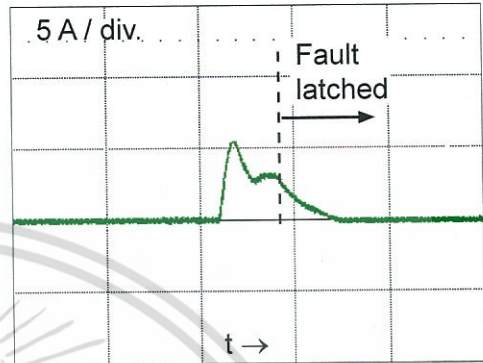


Figure 4: Short-to-Ground Event

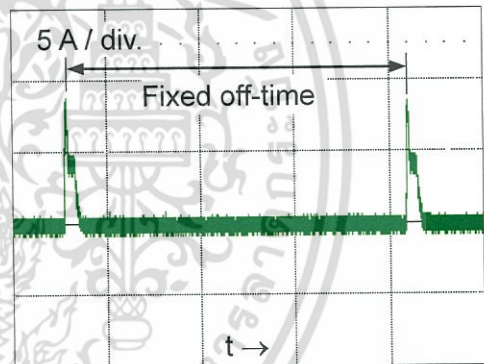


Figure 5: Shorted Load (OUTxA → OUTxB) in Slow Decay Mode

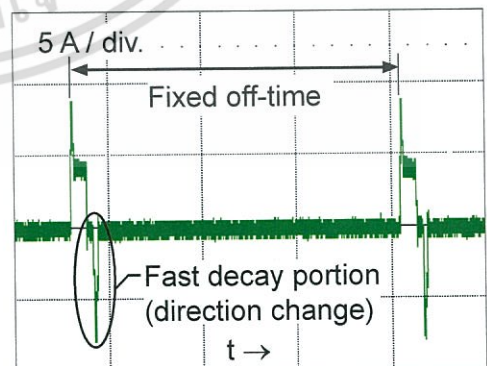
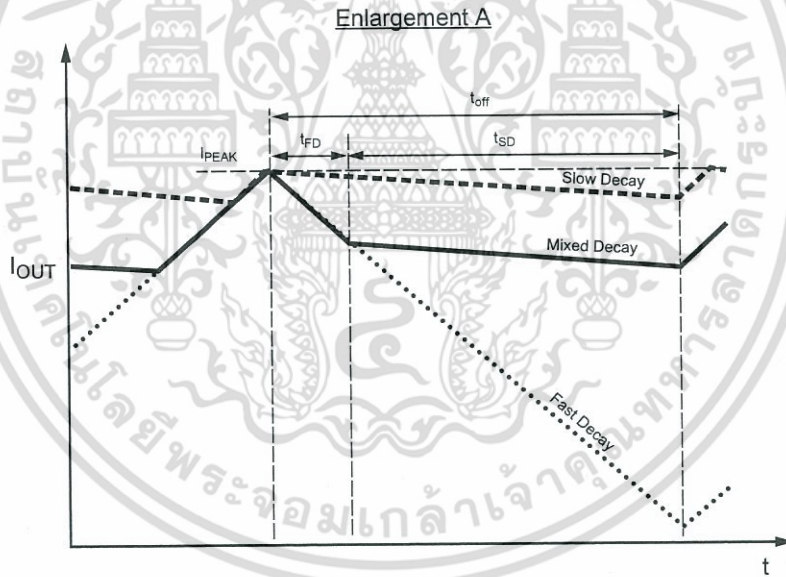
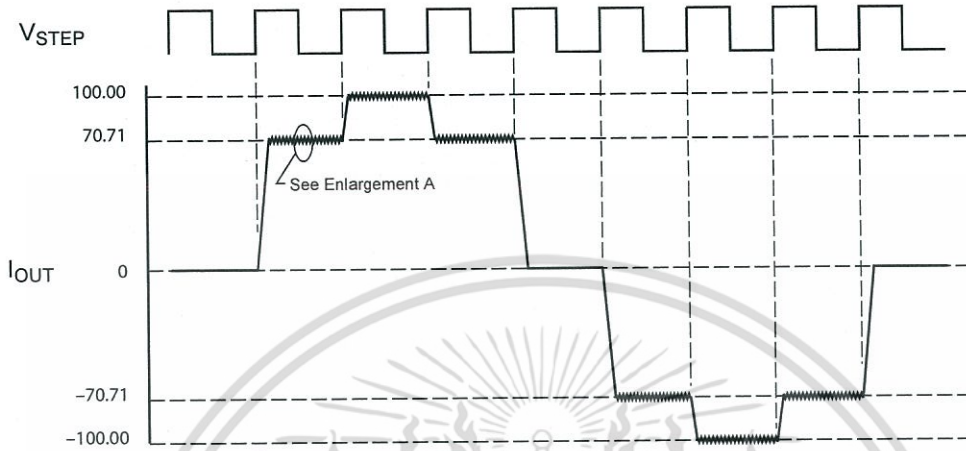


Figure 6: Shorted Load (OUTxA → OUTxB) in Mixed Decay Mode



Symbol	Characteristic
t_{off}	Device fixed off-time
I_{PEAK}	Maximum output current
t_{SD}	Slow decay interval
t_{FD}	Fast decay interval
I_{OUT}	Device output current

Figure 7: Current Decay Modes Timing Chart

Application Layout

Layout. The printed circuit board should use a heavy ground-plane. For optimum electrical and thermal performance, the A4988 must be soldered directly onto the board. Pins 3 and 18 are internally fused, which provides a path for enhanced thermal dissipation. These pins should be soldered directly to an exposed surface on the PCB that connects to thermal vias are used to transfer heat to other layers of the PCB.

In order to minimize the effects of ground bounce and offset issues, it is important to have a low impedance single-point ground, known as a *star ground*, located very close to the device. By making the connection between the pad and the ground plane directly under the A4988, that area becomes an ideal location for a star ground point. A low impedance ground will prevent ground bounce during high current operation and ensure that the supply voltage remains stable at the input terminal.

The two input capacitors should be placed in parallel, and as close to the device supply pins as possible. The ceramic capacitor (CIN1) should be closer to the pins than the bulk capacitor (CIN2). This is necessary because the ceramic capacitor will be responsible for delivering the high frequency current components. The sense resistors, RSx, should have a very low impedance path to ground, because they must carry a large current while supporting very accurate voltage measurements by the current sense comparators. Long ground traces will cause additional voltage drops, adversely affecting the ability of the comparators to accurately measure the current in the windings. The SENSEx pins have very short traces to the RSx resistors and very thick, low impedance traces directly to the star ground underneath the device. If possible, there should be no other components on the sense circuits.

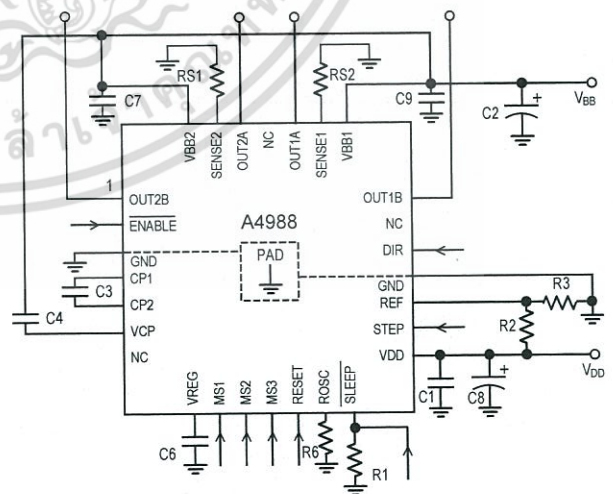
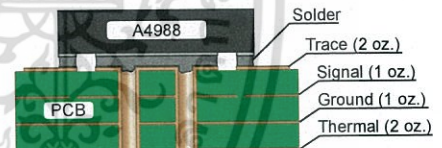
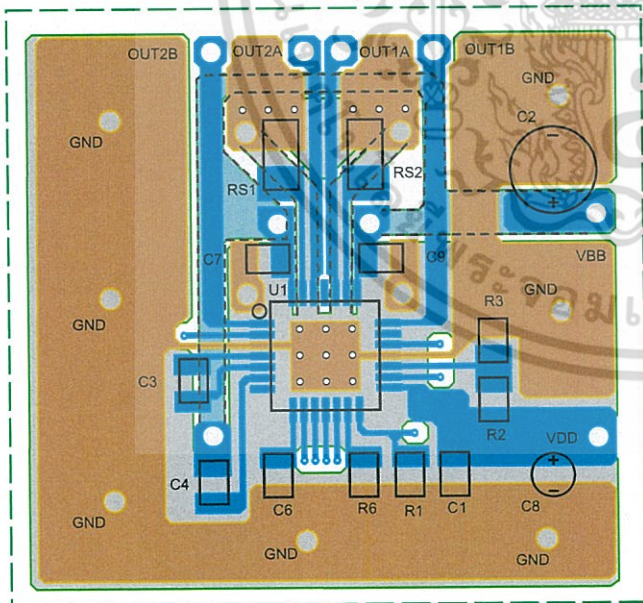
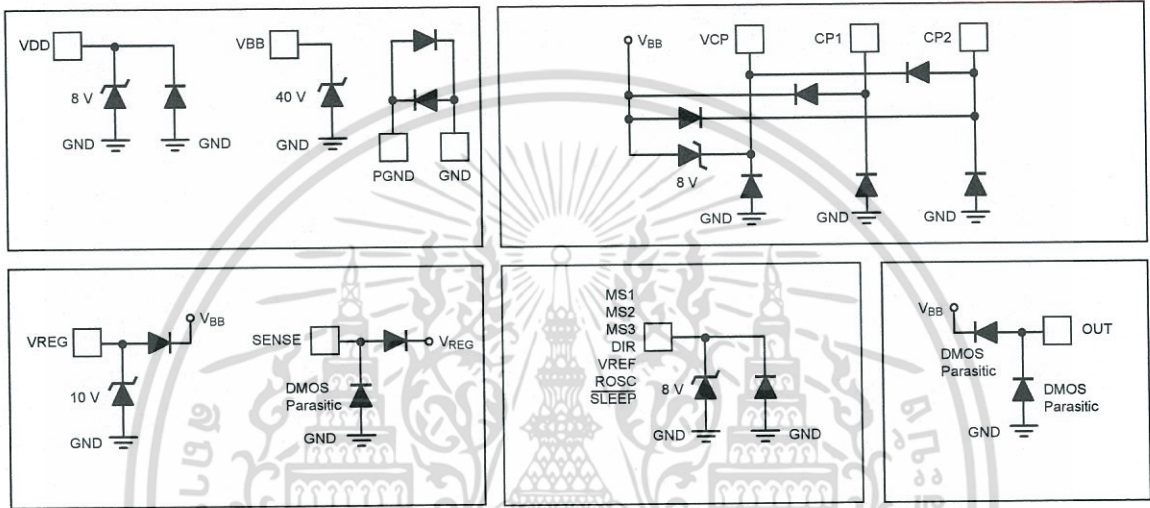
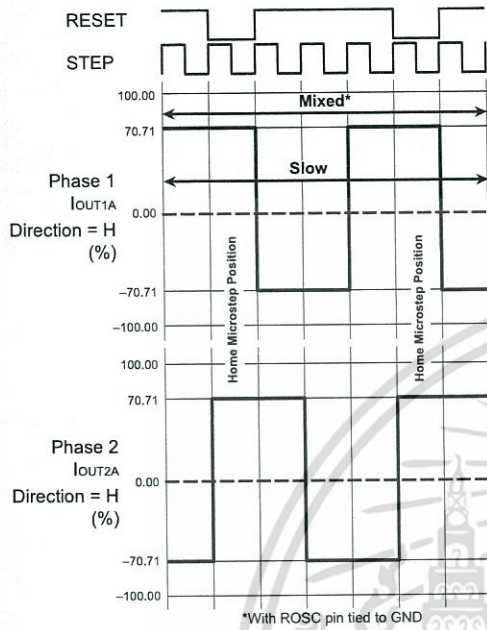


Figure 8: Typical Application and Circuit Layout

Pin Circuit Diagrams

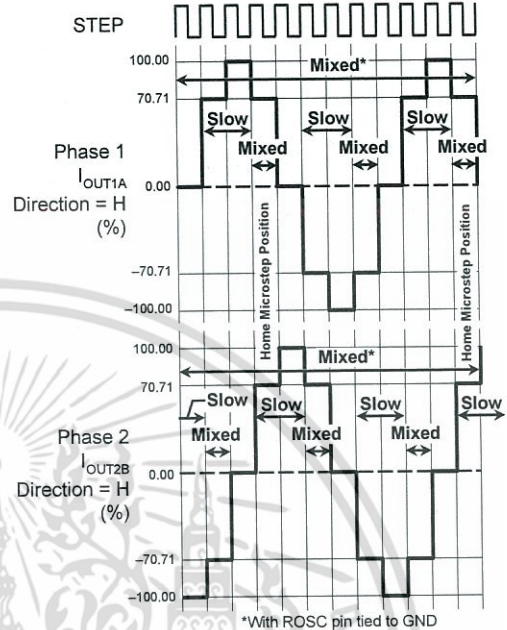




*With ROSC pin tied to GND

DIR= H

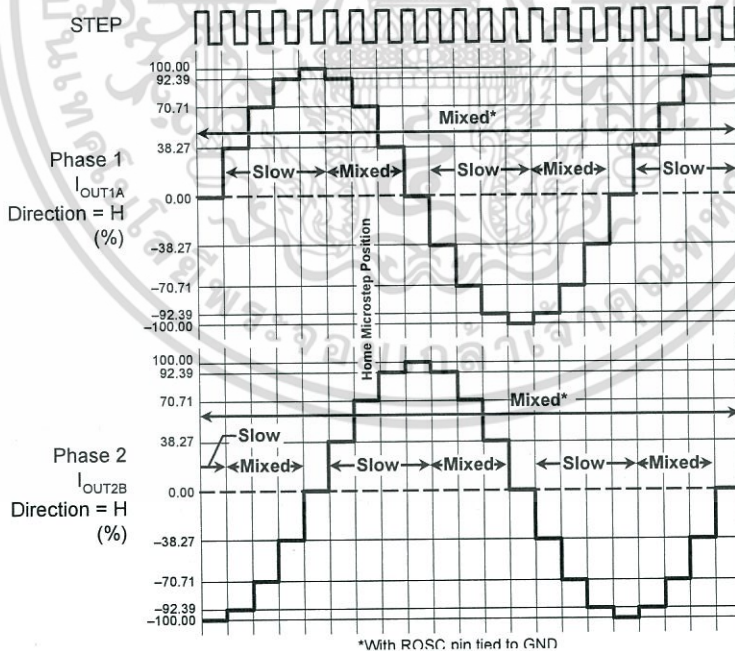
Figure 9: Decay Mode for Full-Step Increments



*With ROSC pin tied to GND

DIR= H

Figure 10: Decay Modes for Half-Step Increments



*With ROSC pin tied to GND

DIR= H

Figure 11: Decay Modes for Quarter-Step Increments



Allegro MicroSystems, LLC
115 Northeast Cutoff
Worcester, Massachusetts 01615-0036 U.S.A.
1.508.853.5000; www.allegromicro.com

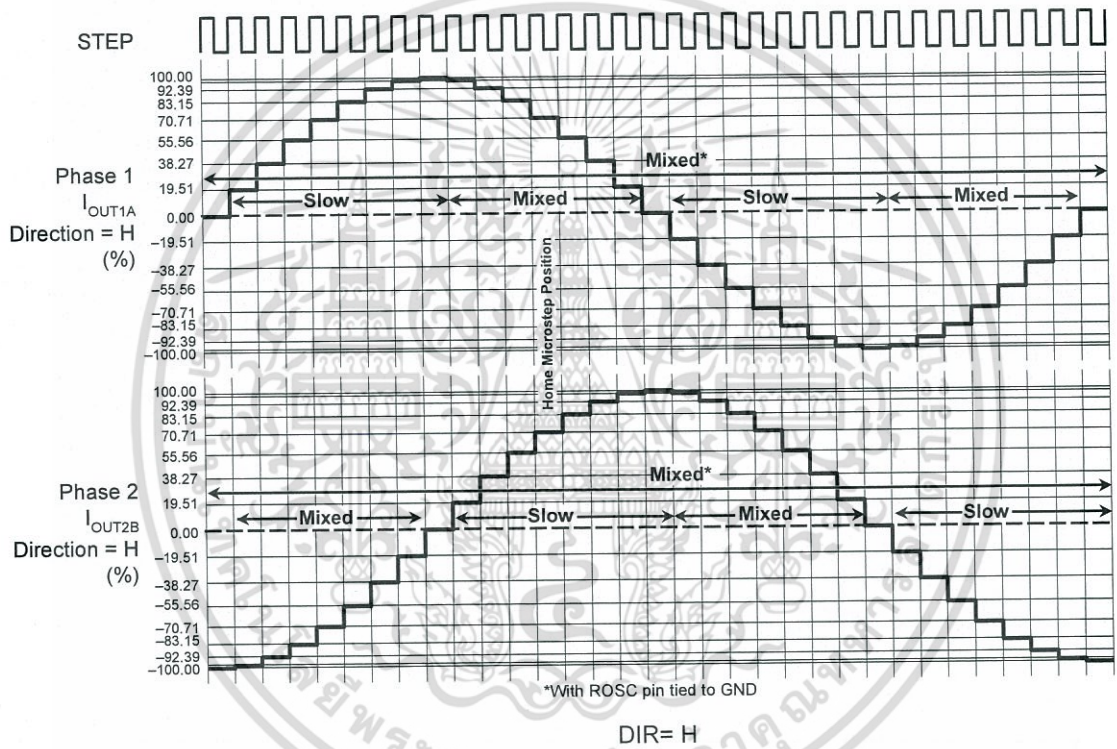


Figure 12: Decay Modes for Eighth-Step Increments

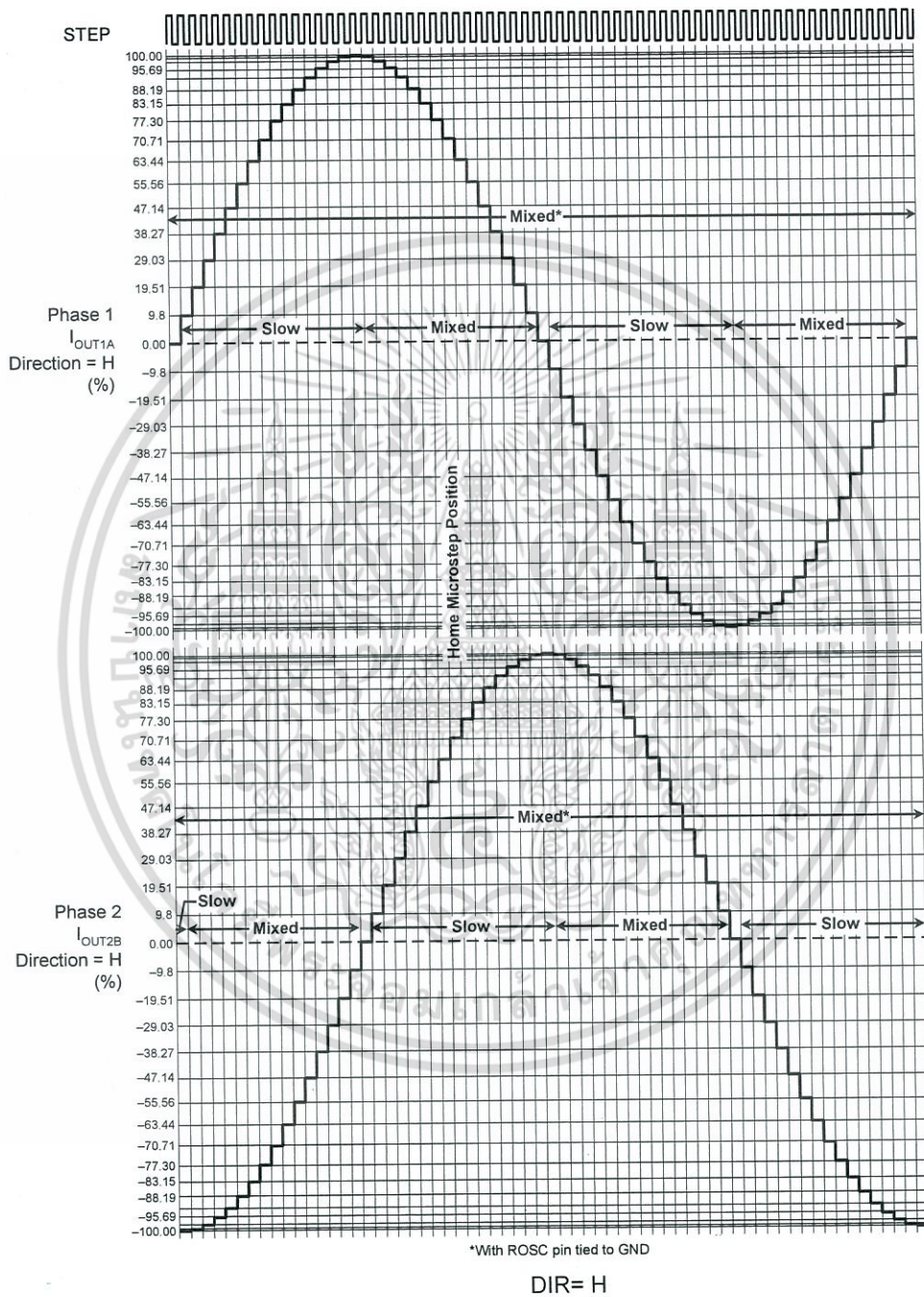


Figure 13: Decay Modes for Sixteenth-Step Increments

A4988

DMOS Microstepping Driver with Translator And Overcurrent Protection

Table 2: Step Sequencing Settings
Home microstep position at Step Angle 45°; DIR = H

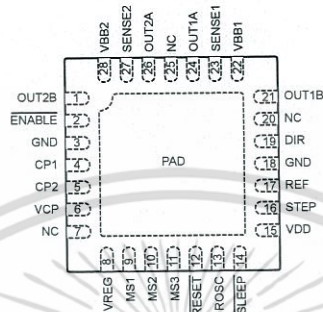
Full Step #	Half Step #	1/4 Step #	1/8 Step #	1/16 Step #	Phase 1 Current [% I _{tripMax}] (%)	Phase 2 Current [% I _{tripMax}] (%)	Step Angle (°)	Full Step #	Half Step #	1/4 Step #	1/8 Step #	1/16 Step #	Phase 1 Current [% I _{tripMax}] (%)	Phase 2 Current [% I _{tripMax}] (%)	Step Angle (°)
	1	1	1	1	100.00	0.00	0.0								
				2	99.52	9.80	5.6		5	9	17	33	-100.00	0.00	180.0
				3	98.08	19.51	11.3					34	-99.52	-9.80	185.6
			2	4	95.69	29.03	16.9				18	35	-98.08	-19.51	191.3
				5	92.39	38.27	22.5					36	-95.69	-29.03	196.9
		2	3	6	88.19	47.14	28.1			10	19	37	-92.39	-38.27	202.5
				7	83.15	55.56	33.8					38	-88.19	-47.14	208.1
			4	8	77.30	63.44	39.4				20	39	-83.15	-55.56	213.8
				9	70.71	70.71	45.0					40	-77.30	-63.44	219.4
1	2	3	5	10	63.44	77.30	50.6	3	6	11	21	41	-70.71	-70.71	225.0
				11	55.56	83.15	56.3					42	-63.44	-77.30	230.6
			6	12	47.14	88.19	61.9				22	43	-55.56	-83.15	236.3
				13	38.27	92.39	67.5					44	-47.14	-88.19	241.9
		4	7	14	29.03	95.69	73.1			12	23	45	-38.27	-92.39	247.5
				15	19.51	98.08	78.8					46	-29.03	-95.69	253.1
			8	16	9.80	99.52	84.4				24	47	-19.51	-98.08	258.8
				17	0.00	100.00	90.0		7	13	25	49	0.00	-100.00	270.0
				18	-9.80	99.52	95.6					50	9.80	-99.52	275.6
			10	19	-19.51	98.08	101.3				26	51	19.51	-98.08	281.3
				20	-29.03	95.69	106.9					52	29.03	-95.69	286.9
		6	11	21	-38.27	92.39	112.5			14	27	53	38.27	-92.39	292.5
				22	-47.14	88.19	118.1					54	47.14	-88.19	298.1
			12	23	-55.56	83.15	123.8				28	55	55.56	-83.15	303.8
				24	-63.44	77.30	129.4					56	63.44	-77.30	309.4
				25	-70.71	70.71	135.0	4	8	15	29	57	70.71	-70.71	315.0
2	4	7	13	26	-77.30	63.44	140.6					58	77.30	-63.44	320.6
				27	-83.15	55.56	146.3				30	59	83.15	-55.56	326.3
				28	-88.19	47.14	151.9					60	88.19	-47.14	331.9
		8	15	29	-92.39	38.27	157.5			16	31	61	92.39	-38.27	337.5
				30	-95.69	29.03	163.1					62	95.69	-29.03	343.1
			16	31	-98.08	19.51	168.8				32	63	98.08	-19.51	348.8
				32	-99.52	9.80	174.4					64	99.52	-9.80	354.4



Allegro MicroSystems, LLC
115 Northeast Cutoff
Worcester, Massachusetts 01615-0036 U.S.A.
1.508.853.5000; www.allegromicro.com

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษานี้ ไม่อนุญาตให้เผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตจาก Allegro MicroSystems, LLC
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Pin-out Diagram



Terminal List Table

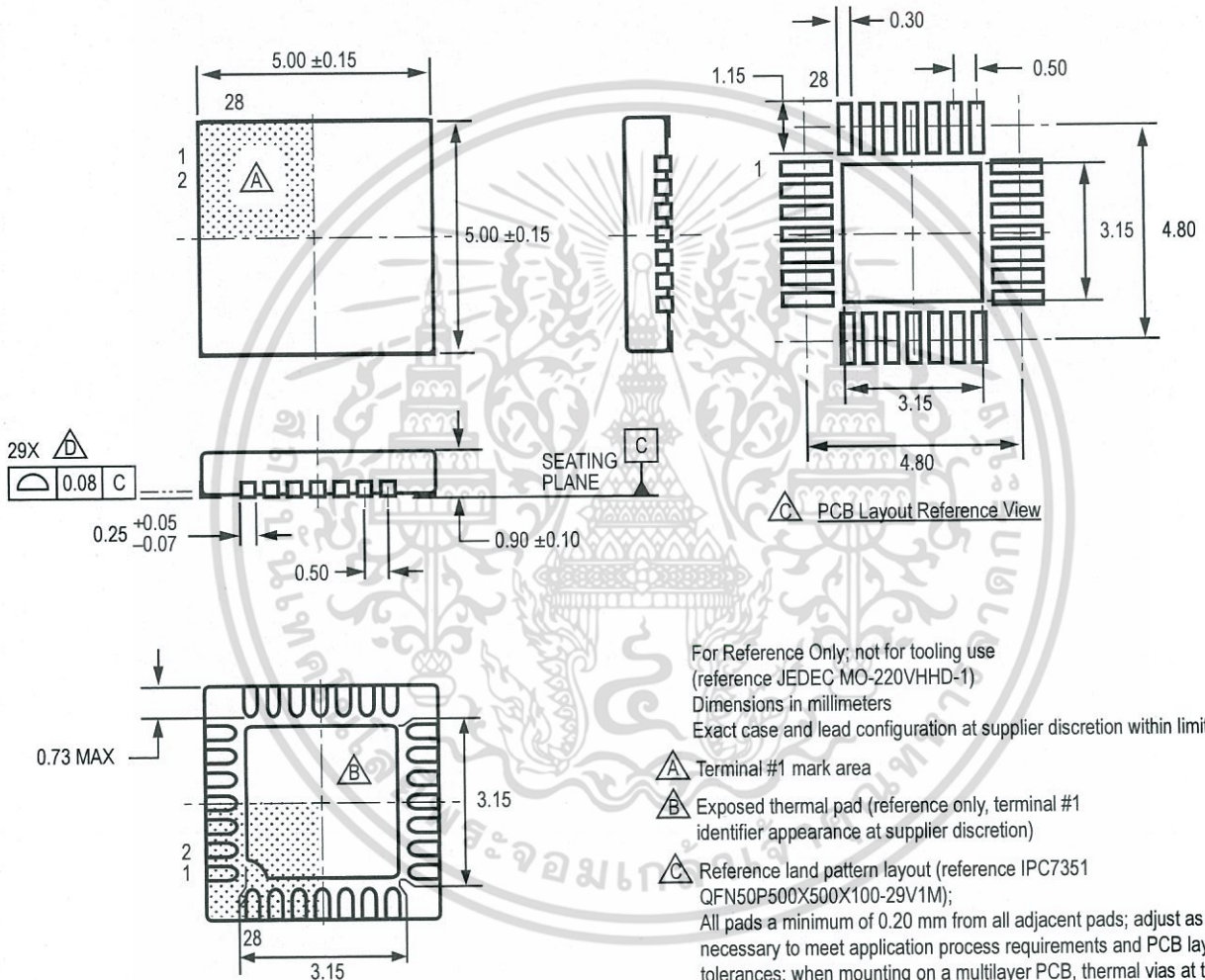
Name	Number	Description
CP1	4	Charge pump capacitor terminal
CP2	5	Charge pump capacitor terminal
VCP	6	Reservoir capacitor terminal
VREG	8	Regulator decoupling terminal
MS1	9	Logic input
MS2	10	Logic input
MS3	11	Logic input
RESET	12	Logic input
ROSC	13	Timing set
SLEEP	14	Logic input
VDD	15	Logic supply
STEP	16	Logic input
REF	17	G _m reference voltage input
GND	3, 18	Ground*
DIR	19	Logic input
OUT1B	21	DMOS Full Bridge 1 Output B
VBB1	22	Load supply
SENSE1	23	Sense resistor terminal for Bridge 1
OUT1A	24	DMOS Full Bridge 1 Output A
OUT2A	26	DMOS Full Bridge 2 Output A
SENSE2	27	Sense resistor terminal for Bridge 2
VBB2	28	Load supply
OUT2B	1	DMOS Full Bridge 2 Output B
ENABLE	2	Logic input
NC	7, 20, 25	No connection
PAD	-	Exposed pad for enhanced thermal dissipation*

*The GND pins must be tied together externally by connecting to the PAD ground plane under the device.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ET Package, 28-Pin QFN with Exposed Thermal Pad



For Reference Only; not for tooling use
(reference JEDEC MO-220VHDD-1)
Dimensions in millimeters
Exact case and lead configuration at supplier discretion within limits shown

- △ Terminal #1 mark area
- △ Exposed thermal pad (reference only, terminal #1 identifier appearance at supplier discretion)
- △ Reference land pattern layout (reference IPC7351 QFN50P500X500X100-29V1M); All pads a minimum of 0.20 mm from all adjacent pads; adjust as necessary to meet application process requirements and PCB layout tolerances; when mounting on a multilayer PCB, thermal vias at the exposed thermal pad land can improve thermal dissipation (reference EIA/JEDEC Standard JESD51-5)
- △ Coplanarity includes exposed thermal pad and terminals



Allegro MicroSystems, LLC
115 Northeast Cutoff
Worcester, Massachusetts 01615-0036 U.S.A.
1.508.853.5000; www.allegromicro.com

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษายเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Revision History

Revision	Revision Date	Description of Revision
4	January 27, 2012	Update I _{OC} PST
5	May 7, 2014	Revised text on pg. 9; revised Figure 8 and Table 2



Copyright ©2009-2014, Allegro MicroSystems, LLC

Allegro MicroSystems, LLC reserves the right to make, from time to time, such departures from the detail specifications as may be required to permit improvements in the performance, reliability, or manufacturability of its products. Before placing an order, the user is cautioned to verify that the information being relied upon is current.

Allegro's products are not to be used in any devices or systems, including but not limited to life support devices or systems, in which a failure of Allegro's product can reasonably be expected to cause bodily harm.

The information included herein is believed to be accurate and reliable. However, Allegro MicroSystems, LLC assumes no responsibility for its use; nor for any infringement of patents or other rights of third parties which may result from its use.

For the latest version of this document, visit our website:
www.allegromicro.com



Allegro MicroSystems, LLC
115 Northeast Cutoff
Worcester, Massachusetts 01615-0036 U.S.A.
1.508.853.5000; www.allegromicro.com

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้มาเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

SDP600 Series (SDP6xx/5xx)

Low-cost Digital Differential Pressure Sensor

- Accuracy better than 0.2% FS near zero
- Digital output (I²C)
- Excellent repeatability, even below 10 Pa
- Calibrated and temperature compensated
- Excellent long-term stability
- Flow measurement in bypass configuration



Product Summary

The SDP600 sensor family is Sensirion's series of digital differential pressure sensors designed for high-volume applications. They measure the pressure of **air and non-aggressive gases** with superb accuracy and no offset drift. The sensors cover a **pressure range of up to ±500 Pa** (± 2 inch H₂O / ± 5 mbar) and deliver **outstanding accuracy** even at the bottom end of the measuring range.

The SDP600 series operates from a 3.3V supply voltage and features a digital 2-wire interface, which makes it easy to connect directly to a microprocessor. The signal is internally **linearized** and **temperature compensated**.

The outstanding performance of these sensors is based on Sensirion's **patented CMOSens® sensor technology**, which combines the sensor element, signal processing and digital calibration on a tiny microchip. The differential pressure is measured by a thermal sensor element using flow-through technology. Compared with membrane-based sensors, the SDP600 features an **extended dynamic range**, better **long-term stability**, and improved repeatability, especially near zero.

The well-proven CMOS technology is perfectly suited for high-quality mass production and is the ideal choice for **demanding** and **cost-sensitive OEM applications**.

Applications

- Medical
- HVAC
- Automotive
- Process automation
- Burner control

Sensor chip

The SDP600 series features a fourth-generation silicon sensor chip called SF04. In addition to a thermal mass flow sensor element, the chip contains an amplifier, A/D converter, EEPROM memory, digital signal processing circuitry, and interface. The highly sensitive chip requires only a minuscule amount of gas flow through the sensor.

OEM options

A variety of custom options can be implemented for high-volume OEM applications. Ask us for more information.

1. Sensor Performance

1.1 Physical specifications¹

Parameter	SDP600-500Pa SDP610-500Pa	SDP600-125Pa SDP610-125Pa	SDP600-25Pa SDP610-25Pa	SDP601 SDP611	SDP500 SDP510	SDP501 SDP511
Short Description	Standard	Low DP	Lowest DP	"Mass Flow"	Low cost	Low cost "Mass Flow"
Calibrated range ²	- 500 Pa to + 500 Pa (± 2.0 in. H ₂ O)	- 125 Pa to + 125 Pa (± 0.5 in. H ₂ O)	- 25 Pa to + 25 Pa (± 0.1 in. H ₂ O)	- 500 to + 500 Pa (± 2.0 in. H ₂ O)	0 Pa to +500 Pa (0 to 2.0 in. H ₂ O)	
Temperature- compensation	yes	yes	yes	mass flow ³	yes	mass flow ³
Resolution	12 bits preset ⁴ (adjustable from 9 to 16 bit)					
Zero point accuracy ^{5,6}	0.2 Pa		0.1 Pa			0.2 Pa
Span accuracy ^{5,6}	3% of reading				4.5% of reading	
Zero point repeatability ^{5,6}	0.1 Pa	0.05 Pa	0.03 Pa		0.1 Pa	
Span repeatability ^{5,6}	0.5% of reading					
Offset shift due to temperature variation	None (less than resolution)					
Span shift due to temperature variation	< 0.5% of reading per 10°C					
Offset stability	< 0.1 Pa/year					
Response time ⁴	4.6 ms typical at 12-bit resolution					
Warm-up time for first reliable measurement	Typ. 50 ms (first measurement typically after 16 ms)					

¹ Unless otherwise noted, all sensor specifications are valid at 25°C with V_{dd} = 3.3 V and absolute pressure = 966 mbar.

² The SDP50x/SDP51x sensors can detect negative differential pressures in the range of -500 to 0Pa. A negative differential pressure is represented by a negative value. The accuracy of the negative differential pressure is not specified and might have significant inter-sensor variation.

³ Please see chapter 5.3 for details.

⁴ See Application Note for response times with other resolutions, e.g. 1.3 ms with 10 bits.

⁵ With 12-bit resolution; includes repeatability and hysteresis.

⁶ Total accuracy/repeatability is a sum of zero-point and span accuracy/repeatability.

1.2 Ambient conditions

Parameter	SDP5xx / SDP6xx Series
Calibrated for ⁷	Air, N ₂
Media compatibility	Air, N ₂ , O ₂
Calibrated temperature range	-20 °C to +80 °C
Operating temperature	-20 °C to +80 °C
Storage temperature ⁷	-40 °C to +80 °C
Position sensitivity	Less than repeatability error

1.3 Materials

Parameter	SDP5xx / SDP6xx Series
Wetted materials	PBT (polybutylene terephthalate), glass (silicon nitride, silicon oxide), silicon, gold, FR4, silicone as static sealing, epoxy, copper alloy, lead-free solder
REACH, RoHS	REACH and RoHS compliant

2. Electrical Specifications

Parameter	SDP5xx / SDP6xx
Operating voltage	3.0–3.6 V (A supply voltage of 3.3 V is recommended)
Current drain	< 6 mA typical in operation
Interface	Digital 2-wire interface (I ² C)
Bus clock frequency	100 kHz typical, 400 kHz max.
Default I ² C address	64 (binary: 1000 000)
Scale factor⁸	
SDP6xx-500Pa & SDP5xx	60 Pa ⁻¹
SDP6x0-125Pa	240 Pa ⁻¹
SDP6x0-25Pa	1200 Pa ⁻¹
Scale factor to alternative units ⁹	For all 500 Pa versions: 6'000 mbar ⁻¹ 413'686 psi ⁻¹ 14'945 (inch H ₂ O) ⁻¹
SDP 6x0-125Pa	24'000 mbar ⁻¹ 1'654'744 psi ⁻¹ 59'780 (inch H ₂ O) ⁻¹
SDP6x0-25Pa	120'000 mbar ⁻¹ 8'273'719 psi ⁻¹ 298'900 (inch H ₂ O) ⁻¹

⁷ Contact Sensirion for information about other gases, wider calibrated temperature ranges and higher storage temperatures.

⁸ See section 5.1. The scale factor may vary with other configurations.

⁹ Instead of the standard scale factor (to get the physical value in Pa), the sensor output may be divided by alternative scale factors to receive the physical value in another unit.

3. Interface Specifications

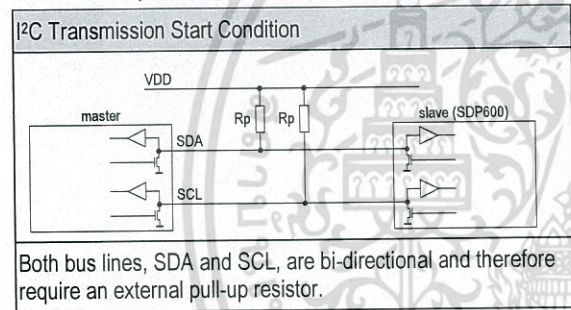
The serial interface of the SDP600 series is compatible with I²C interfaces. For detailed specifications of the I²C protocol, see *The I²C Bus Specification* (source: NXP).

3.1 Interface connection – external components

Bi-directional bus lines are implemented by the devices (master and slave) using open-drain output stages and a pull-up resistor connected to the positive supply voltage.

The recommended pull-up resistor value depends on the system setup (capacitance of the circuit or cable and bus clock frequency). In most cases, 10 kΩ is a reasonable choice.

The capacitive loads on SDA and SCL line have to be the same. It is important to avoid asymmetric capacitive loads.

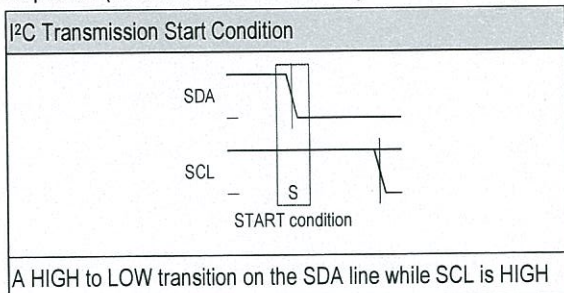


3.2 I²C Address

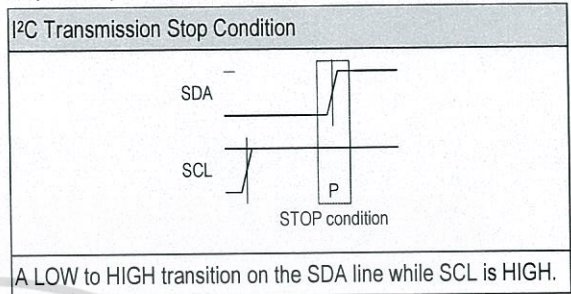
The I²C address consists of a 7-digit binary value. By default, the I²C address is set to 64 (binary: 1000 000). The address is always followed by a write bit (0) or read bit (1). The default hexadecimal I²C header for read access to the sensor is therefore h81.

3.3 Transfer sequences

Transmission START Condition (S): The START condition is a unique situation on the bus created by the master, indicating to the slaves the beginning of a transmission sequence (the bus is considered busy after a START).

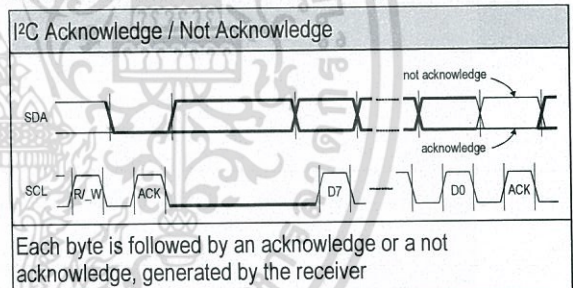


Transmission STOP Condition (P): The STOP condition is a unique situation on the bus created by the master, indicating to the slaves the end of a transmission sequence (the bus is considered free after a STOP).

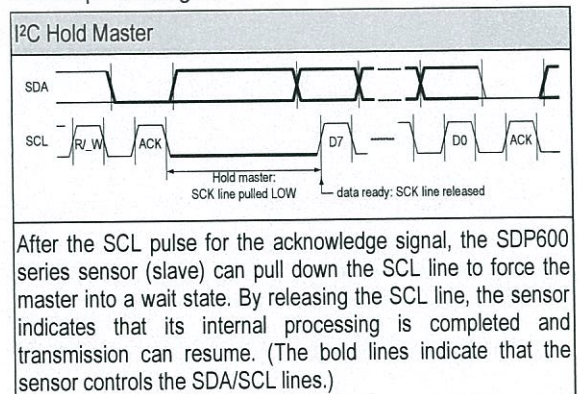


Acknowledge (ACK) / Not Acknowledge (NACK): Each byte (8 bits) transmitted over the I²C bus is followed by an acknowledge condition from the receiver. This means that after the master pulls SCL low to complete the transmission of the 8th bit, SDA will be pulled low by the receiver during the 9th bit time. If after transmission of the 8th bit the receiver does not pull the SDA line low, this is considered to be a NACK condition.

If an ACK is missing during a slave to master transmission, the slave aborts the transmission and goes into idle mode.



Handshake procedure (Hold Master): In a master-slave system, the master dictates when the slaves will receive or transmit data. However, in some situations a slave device may need time to store received data or prepare data to be transmitted. Therefore, a handshake procedure is required to allow the slave to indicate termination of internal processing.



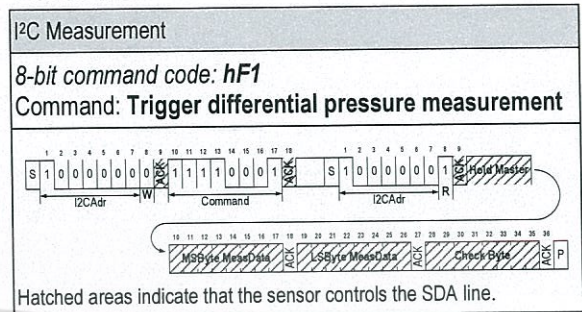
3.4 Data transfer format

Data is transferred in byte packets in the I²C protocol, which means in 8-bit frames. Each byte is followed by an acknowledge bit. Data is transferred with the most significant bit (MSB) first.

A data transfer sequence is initiated by the master generating the Start condition (S) and sending a header byte. The I²C header consists of the 7-bit I²C device address and the data direction bit (R/_W).

The value of the R/_W bit in the header determines the data direction for the rest of the data transfer sequence. If R/_W = 0 (WRITE) the direction remains master-to-slave, while if R/_W = 1 (READ) the direction changes to slave-to-master after the header byte.

byte. The sensor checks whether the master sends an acknowledge after each byte and aborts the transmission if it does not.



Note that the first measurement result after reset is not valid.

4. Command Set and Data Transfer Sequences

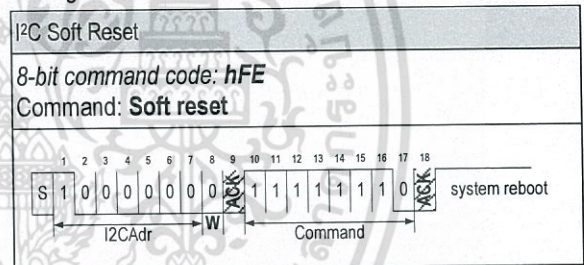
A command is represented by an 8-bit command code. The data direction may not change after the command byte, since the R/_W bit of the preceding I²C header has already determined the direction to be master-to-slave. In order to execute commands in Read mode using I²C, the following principle is used. On successful (acknowledged) receipt of a command byte, the sensor stores the command nibble internally. The Read mode of this command is then invoked by initiating an I²C data transfer sequence with R/_W = 1.

If a correctly addressed sensor recognizes a valid command and access to this command is granted, it responds by pulling down the SDA line during the subsequent SCL pulse for the acknowledge signal (ACK). Otherwise it leaves the SDA line unasserted (NACK).

The two most important commands are described in this data sheet, and the data transfer sequences are specified. Contact Sensirion for advanced sensor options.

4.2 Soft reset

This command forces a sensor reset without switching the power off and on again. On receipt of this command, the sensor reinitializes the control/status register contents from the EEPROM and starts operating according to these settings.



4.1 Measurement triggering

Each individual measurement is triggered by a separate read operation.

Note that two transfer sequences are needed to perform a measurement. First write command byte hF1 (trigger measurement) to the sensor, and then execute a read operation to trigger the measurement and retrieve the flow or differential pressure information.

On receipt of a header with R/_W=1, the sensor generates the Hold Master condition on the bus until the first measurement is completed. After the Hold Master condition is released, the master can read the result as two consecutive bytes. A CRC byte follows if the master continues clocking the SCL line after the second result

4.3 CRC-8 Redundant Data Transmission

Cyclic redundancy checking (CRC) is a popular technique used for error detection in data transmission. The transmitter appends an n-bit checksum to the actual data sequence. The checksum holds redundant information about the data sequence and allows the receiver to detect transmission errors. The computed checksum can be regarded as the remainder of a polynomial division, where the dividend is the binary polynomial defined by the data sequence and the divisor is a "generator polynomial".

The sensor implements the CRC-8 standard based on the generator polynomial

$$x^8 + x^5 + x^4 + 1.$$

Note that CRC protection is only used for data transmitted from the slave to the master.

For details regarding cyclic redundancy checking, please refer to the relevant literature.

5. Conversion to Physical Values

5.1 Signal scaling and physical unit

The calibrated signal read from the sensor is a signed INTEGER number (two's complement number). The INTEGER value can be converted to the physical value by dividing it by the scale factor (pressure = sensor output ÷ scale factor). The scale factor is specified in Section 2.

5.2 Temperature compensation

The SDP600 sensor series features digital temperature compensation. The temperature is measured on the CMOSens® chip by an on-chip temperature sensor. This data is fed to a compensation circuit that is also integrated on the CMOSens® sensor chip. No external temperature compensation is necessary.

5.3 Mass flow temperature compensation

A sensor output proportional to mass flow is necessary for measuring mass flow in a bypass configuration. Even though the output of the SDP sensors with mass flow temperature compensation is still differential pressure, the temperature compensation is adapted especially for mass flow measurements in a bypass configuration. At calibration temperature both calibrations are equivalent. Please find the application note "Bypass Configuration Differential Pressure Sensor SDPxxx" on our website.

5.4 Altitude correction

The SDP600 sensor series achieves its unsurpassed performance by using a dynamic measurement principle. The applied differential pressure forces a small flow of gas through the sensor, which is measured by the flow sensor element. As a result, any variation in gas density affects the sensor reading. While temperature effects are compensated internally, variations in atmospheric pressure (elevation above sea level) can be compensated by a correction factor according to the following formula:

$$DP_{\text{eff}} = DP_{\text{sensor}} \times (P_{\text{cal}} / P_{\text{amb}})$$

- DP_{eff}: Effective differential pressure
 DP_{sensor}: Differential pressure indicated by the sensor
 P_{cal}: Absolute pressure at calibration (966 mbar)
 P_{amb}: Actual ambient absolute pressure.

Altitude correction factors:

Altitude [meters]	Ambient pressure (P _{amb}) [mbar]	Correction factor (P _{cal} / P _{amb})
0	1013	0.95
250	984	0.98
425	966	1.00
500	958	1.01
750	925	1.04

1500	842	1.15
2250	766	1.26
3000	697	1.38

Example: At 750 m above sea level and a sensor reading of 40 Pa, the effective differential pressure is 41.8 Pa.

Note: In many HVAC applications such as air flow measurement in a bypass configuration, the described dependence on absolute pressure is actually welcome because the quantity that must effectively be controlled is the mass flow and not the volume flow. Mass flow is dependent on differential pressure and absolute pressure. For details please refer to our application note "Measuring Flow in a Bypass Configuration".

6. OEM Options

A variety of custom options can potentially be implemented for high-volume OEM applications. Contact Sensirion for more information.

7. Mechanical Specifications

7.1 Mechanical concept

The SDP600 Series is designed for through-hole technology and can be wave-soldered or hand-soldered to a PCB.

- The SDP60x/SDP50x can be directly connected to a manifold using two O-rings.
- The SDP61x/SDP51x sensors have ports for connecting standard-size plastic tubes.

7.2 Mechanical characteristics

Parameter	
PCB attachment	Clip-in and hand or wave soldering. Additional mechanical attachment depending on force requirements
Allowable overpressure	1 bar (100 kPa, 400 inches H ₂ O)
Rated burst pressure	> 5 bar
Gas flow through sensor	< 150 ml/min
Weight	< 6 g
Protection rating	IP 30

7.3 SDP60x/SDP50x – Manifold connection

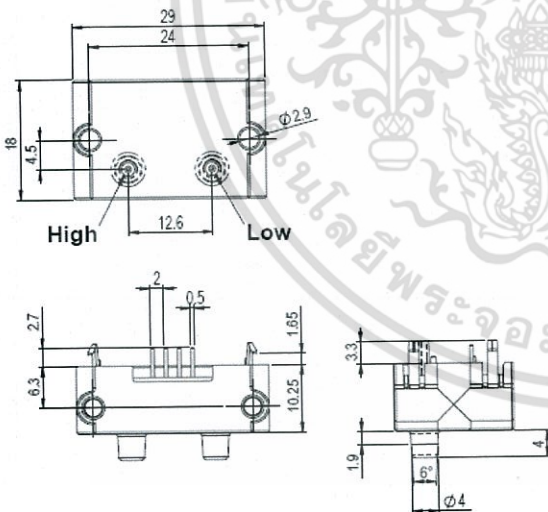


Figure 1: SDP60x/SDP50x manifold mount version. All dimensions are in mm.

Sensirion recommends O-rings with the following dimensions:

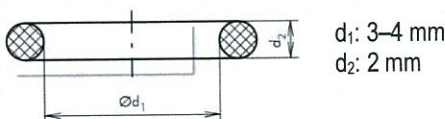


Figure 2: Cross section of recommended O-ring

7.4 SDP61x/SDP51x – Tube connection

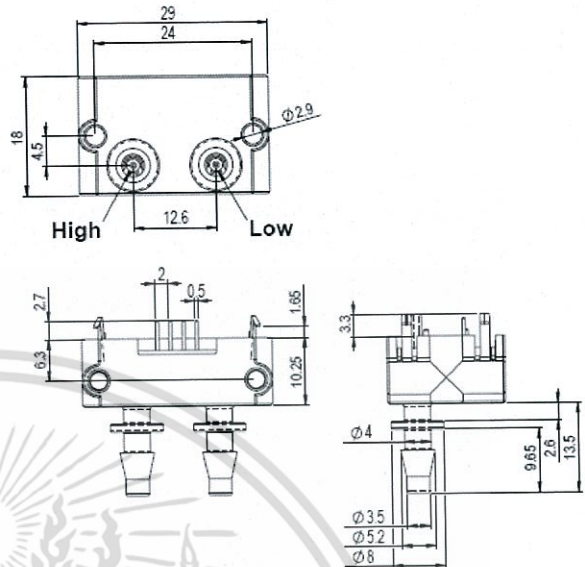


Figure 3: SDP61x/SDP51x version with ports for tube connection. All dimensions are in mm.

7.5 Pin assignments

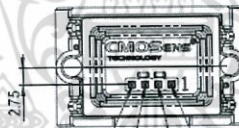


Figure 4: Digital output pin assignments (bottom view).

7.6 Footprint

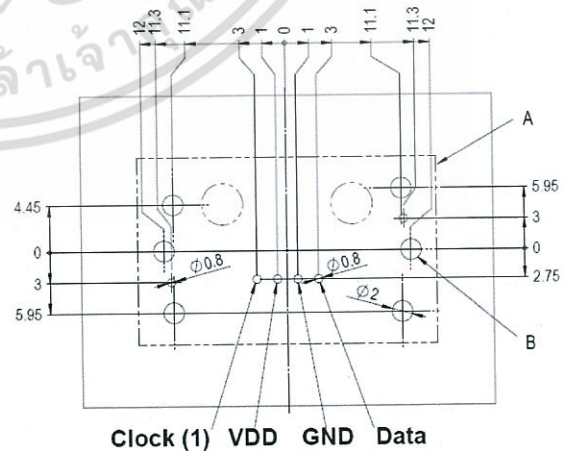


Figure 5: Footprint for PCB mounting. (top view = sensor side). All dimensions in mm.

A: Overall sensor dimensions
B: Holes for additional mounting screws (optional)

8. Instructions for Use

8.1 Soldering instructions

Standard wave soldering systems may be used for soldering SDP600 series sensors. Reflow soldering is **not** feasible and may damage the sensor.

The sensor ports must be protected from solder splash and flux during soldering. Figure 6 shows an appropriate temperature profile with maximum temperature values.

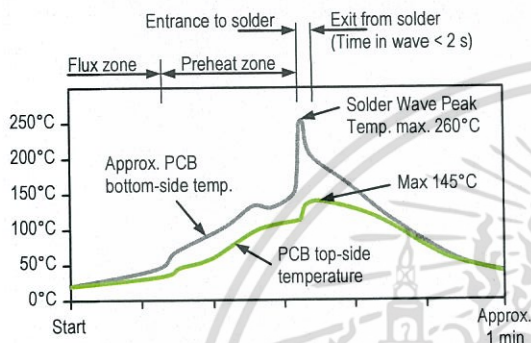


Figure 6: Suitable wave soldering profile.

The characteristics of wave soldering machines vary, so any soldering setup must be tested before production use.

8.2 Sensor handling

The sensors of the SDP600 series are designed to be robust and vibration resistant. Nevertheless, the accuracy of the high-precision SDP600 series can be degraded by rough handling. Sensirion does not guarantee proper operation in case of improper handling. **Note:** avoid applying any mechanical stress to the solder joints of the sensor during or as a result of PCB assembly.

The sensor ships in an antistatic package to prevent electrostatic discharge (ESD), which can damage the part. To avoid such damage, ground yourself using a grounding strap or by touching a grounded object. Furthermore store the parts in the antistatic package when not in use.

8.3 Additional attachment

If necessary, the robustness of the sensor attachment to the PCB can be increased by using a bracket as shown in Figure 7.

Sensirion recommends using this additional bracket when the sensor is fitted to a PCB. The bracket must be secured before the pins are soldered to the PCB, as otherwise sensor performance may be degraded by mechanical stress.

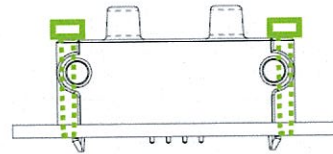


Figure 7: Supplementary bracket for the SDP600 series.

8.4 Air flow and tubing

Due to the dynamic measurement principle, a small air flow is required.

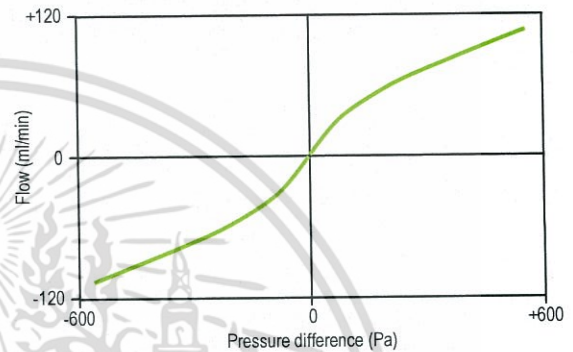


Figure 8: Typical air flow through the SDP600 series sensor.
Note: 1 sccm = 1 cm³/min at 0°C and 1013 mbar (1 sccm = 0.001 standard liter).

This air flow through the sensor creates a dependence on the tube length. The error is less than 1% with a tube length up to 1 m (with 3/16 inch inside diameter).

9. Ordering Information

Use the part names and item numbers shown in the following table when ordering SDP600 series differential pressure sensors. For the latest product information and local distributors, visit www.sensirion.com.

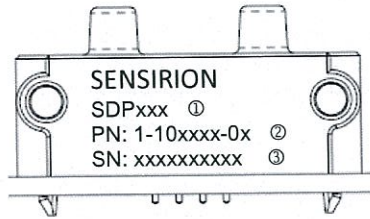
Part name	Description / Output	Calibrated range	"Mass flow"	Span accuracy	Product number 1-10xxxx-xx
SDP500	I ² C, manifold mount	0 to +500 Pa (0 to +2 in. H ₂ O)		4.5%	0601-02
SDP510	I ² C, tube connection	0 to +500 Pa (0 to +2 in. H ₂ O)		4.5%	0602-02
SDP501	I ² C, manifold mount	0 to +500 Pa (0 to +2 in. H ₂ O)	x	4.5%	1314-01
SDP511	I ² C, tube connection	0 to +500 Pa (0 to +2 in. H ₂ O)	x	4.5%	1315-01
SDP600-500Pa	I ² C, manifold mount	±500 Pa (±2 in. H ₂ O)		3%	0456-02
SDP610-500Pa	I ² C, tube connection	±500 Pa (±2 in. H ₂ O)		3%	0455-02
SDP600-125Pa	I ² C, manifold mount	±125 Pa (±0.5 in. H ₂ O)		3%	0760-02
SDP610-125Pa	I ² C, tube connection	±125 Pa (±0.5 in. H ₂ O)		3%	0761-02
SDP600-25Pa	I ² C, manifold mount	±25 Pa (±0.1 in. H ₂ O)		3%	0758-02
SDP610-25Pa	I ² C, tube connection	±25 Pa (±0.1 in. H ₂ O)		3%	0759-02
SDP601-500Pa	I ² C, manifold mount	±500 Pa (±2 in. H ₂ O)	x	3%	0603-02
SDP611-500Pa	I ² C, tube connection	±500 Pa (±2 in. H ₂ O)	x	3%	0604-02

Packaging units: 80 items/tray and 480 items/box.

9.1 Packaging

Housing: The sensor housing consists of PBT. The device is fully RoHS compliant – it is free of Pb, Cd, Hg, Cr(6+), PBB and PBDE.

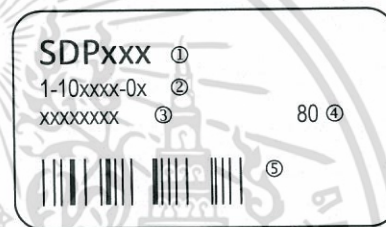
Each sensor is labeled by laser printing on the front side:



- ① Sensor type
- ② Sensorion product number
- ③ Serial number

Figure 9: Marking of the housing.

Traceability Information: SDPxxx are shipped in trays of 80pcs. The tray dimension is 355mm x 255mm x 21.5mm. By piling them up, the height per tray can be considered as 19mm. For traceability, each tray is marked with a label. No information can be derived from the code directly, respective data is stored at Sensirion AG and is provided upon request.



- ① Sensor type
- ② Sensorion item number
- ③ Lot number
- ④ Number of sensors inside tray
- ⑤ Barcode of lot number

Figure 10: Label sticking on each tray

Revision history

Date	Author	Version	Changes
Sept, 2008	PHA	V1.0	Initial release
Nov, 2008	PHA	V1.1	Small amendments (power consumption, asymmetric lines and US office address)
Jan, 2009	PHA	V1.2	Explanation to SDP5x0 calibration range, media compatibility extended
Feb, 2009	PHA	V1.3	Packaging information added, sensor handling instruction
Nov, 2009	PHA	V1.4	Zero point accuracy changed. Supply voltage requirements and recommendations relaxed.
January, 2011	DAT	V1.5	Introduction of low power versions(SDP6x6) and low differential pressure versions SDP6xx-125Pa / SDP6xx-25Pa.
Feb, 2011	VVO	V1.6	Calibrated Temperature Range is extended, minor corrections
Sept, 2012	ANB	V1.7	Updated Product Number.
June, 2015	ANB	V1.8	Added SDP5x1. Moved SDP6x6 to separate datasheet. Minor updates.
July, 2015	ANB	V1.9	Fixed broken link in chapter 5.

Important Notices

Warning, personal injury

Do not use this product as safety or emergency stop devices or in any other application where failure of the product could result in personal injury (including death). Do not use this product for applications other than its intended and authorized use. Before installing, handling, using or servicing this product, please consult the datasheet and application notes. Failure to comply with these instructions could result in death or serious injury.

If the Buyer shall purchase or use SENSIRION products for any unintended or unauthorized application, Buyer shall defend, indemnify and hold harmless SENSIRION and its officers, employees, subsidiaries, affiliates and distributors against all claims, costs, damages and expenses, and reasonable attorney fees arising out of, directly or indirectly, any claim of personal injury or death associated with such unintended or unauthorized use, even if SENSIRION shall be allegedly negligent with respect to the design or the manufacture of the product.

ESD Precautions

The inherent design of this component causes it to be sensitive to electrostatic discharge (ESD). To prevent ESD-induced damage and/or degradation, take customary and statutory ESD precautions when handling this product.

See application note "Handling Instructions" for more information.

Warranty

SENSIRION warrants solely to the original purchaser of this product for a period of 12 months (one year) from the date of delivery that this product shall be of the quality, material and workmanship defined in SENSIRION's published specifications of the product. Within such period, if proven to be defective, SENSIRION shall repair and/or replace this product, in SENSIRION's discretion, free of charge to the Buyer, provided that:

- notice in writing describing the defects shall be given to SENSIRION within fourteen (14) days after their appearance;

- such defects shall be found, to SENSIRION's reasonable satisfaction, to have arisen from SENSIRION's faulty design, material, or workmanship;
- the defective product shall be returned to SENSIRION's factory at the Buyer's expense; and
- the warranty period for any repaired or replaced product shall be limited to the unexpired portion of the original period.

This warranty does not apply to any equipment which has not been installed and used within the specifications recommended by SENSIRION for the intended and proper use of the equipment. EXCEPT FOR THE WARRANTIES EXPRESSLY SET FORTH HEREIN, SENSIRION MAKES NO WARRANTIES, EITHER EXPRESS OR IMPLIED, WITH RESPECT TO THE PRODUCT. ANY AND ALL WARRANTIES, INCLUDING WITHOUT LIMITATION, WARRANTIES OF MERCHANTABILITY OR FITNESS FOR A PARTICULAR PURPOSE, ARE EXPRESSLY EXCLUDED AND DECLINED.

SENSIRION is only liable for defects of this product arising under the conditions of operation provided for in the datasheet and proper use of the goods. SENSIRION explicitly disclaims all warranties, express or implied, for any period during which the goods are operated or stored not in accordance with the technical specifications.

SENSIRION does not assume any liability arising out of any application or use of any product or circuit and specifically disclaims any and all liability, including without limitation consequential or incidental damages. All operating parameters, including without limitation recommended parameters, must be validated for each customer's applications by customer's technical experts. Recommended parameters can and do vary in different applications.

SENSIRION reserves the right, without further notice, (i) to change the product specifications and/or the information in this document and (ii) to improve reliability, functions and design of this product.

Copyright © 2001-2015, SENSIRION.
CMOSens® is a trademark of Sensirion
All rights reserved

Headquarters and Subsidiaries

SENSIRION AG
Laubisruetistr. 50
CH-8712 Staefa ZH
Switzerland

phone: +41 44 306 40 00
fax: +41 44 306 40 30
info@sensirion.com
www.sensirion.com

Sensirion AG (Germany)
phone: +41 44 927 11 66
info@sensirion.com
www.sensirion.com

Sensirion Inc., USA
phone: +1 805 409 4900
info_us@sensirion.com
www.sensirion.com

Sensirion Japan Co. Ltd.
phone: +81 3 3444 4940
info@sensirion.co.jp
www.sensirion.co.jp

Sensirion Korea Co. Ltd.
phone: +82 31 337 7700-3
info@sensirion.co.kr
www.sensirion.co.kr

Sensirion China Co. Ltd.
phone: +86 755 8252 1501
info@sensirion.com.cn
www.sensirion.com.cn

To find your local representative, please visit www.sensirion.com/contact



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

