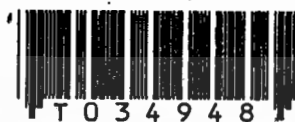


การสร้างเครื่องมือวัดความดันมาตรฐานชั้นปฐม

A FABRICATION OF PRIMARY PRESSURE MEASURING INSTRUMENT



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ.2542

ISBN 974-622-628-2

เลขหมู่.....

เลขทะเบียน..... 34948

วัน, เดือน, ปี..... 8 ก.พ. 2543

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

A FABRICATION OF PRIMARY PRESSURE MEASURING INSTRUMENT



A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
MASTER OF SCIENCE IN APPLIED PHYSICS
SCHOOL OF GRADUATE STUDIES
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

1999

ISBN 974-622-628-2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 1999

SCHOOL OF GRADUATE STUDIES

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การสร้างเครื่องมือวัดความดันมาตรฐานขั้นปฐม	
นักศึกษา	นางสาวรังสิยา	วงษ์สุติน
รหัสประจำตัว	35626006	
ปริญญา	วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต สาขาฟิสิกส์ประยุกต์	
สาขาวิชา	ฟิสิกส์ประยุกต์	
พ.ศ.	2542	
อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์	รศ.สุรพล	รักวิจัย
	นายสมโภชน์	บุญสนิท

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาและสร้างเครื่องมือวัดความดันมาตรฐานขั้นปฐม เป็นมาโนมิเตอร์ท่อใสรูปตัว ยู เพื่อวัดค่าความดันเกจ ด้วยความสัมพันธ์ของความหนาแน่นของปรอท ค่าแรงโน้มถ่วงของโลก และผลต่างของระดับความสูงของลำปรอทในหลอดแก้วทั้งสองด้าน โดยที่สองปริมาณแรกนั้นเป็นค่าคงที่ที่นำมาใช้ ทั้งนี้ได้มีการสอบย้อนกลับของปริมาณทั้งสองแล้ว ดังนั้นปริมาณที่สำคัญในการวัดค่าความดันของงานวิจัยนี้จึงมุ่งไปที่การหาค่าระยะของผลต่างของระดับความสูงของลำปรอท ในค่าที่ละเอียดถูกต้องและแม่นยำ ด้วยการใช้หลักการของแสงในปรากฏการณ์การแทรกสอดโดยวิธีของไมเคิลสัน อินเทอร์เฟอโรมิเตอร์ เพื่อทำการตรวจนับริ้วรอยของการแทรกสอด แล้วนำมาประมวลผล ทำให้ทราบระยะทางออกมา โดยใช้การประมวลผลด้วยคอมพิวเตอร์ผ่านอินเตอร์เฟซการ์ด ชนิด ET-DIO CARD แล้วคำนวณค่าความดันที่อ่านได้ด้วยโปรแกรมภาษาปาสคาล จากขีดจำกัดของความสูงของหลอดแก้วรูปตัวยู และระดับผลต่างของลำปรอททั้งสองข้างมากที่สุดเป็น 1 เมตร ดังนั้นเครื่องมือมาตรฐานขั้นปฐมที่สร้างขึ้นสำหรับงานวิจัยนี้จึงสามารถวัดค่าความดันสูงสุดได้ 130 กิโลปาสคาล โดยมีค่าความละเอียดในเทอมของระยะทางเป็น 0.3 ไมโครเมตร

Thesis Title	A Fabrication of Primary Pressure Measuring Instrument	
Student	Rungsiya Wongsudin	
Student ID.	35626006	
Degree	Master of Science (Applied Physics)	
Programme	Applied Physics	
Year	1999	
Thesis Advisor	Assoc. Prof. Surapon	Rakvijai
Thesis Co-Advisor	Mr. Sompote	Bunsanit

ABSTRACT

This research focuses on the study of a fabrication of primary pressure measuring instrument which a u-tube manometer is utilized for static measurement of gauge pressure by relative density of mercury, gravity and the differences between the levels of two mercury columns. By using the Michelson interferometer's optical technique for high resolution measuring, the system is principally consists of light source, optical processing unit, detector and computer for signal processing unit. It was found that this instrument can be used to calibrate pressure gauge up to 130 kPa at the resolution in the distance is 0.3 μm .

กิตติกรรมประกาศ

ในการจัดทำวิทยานิพนธ์นี้สำเร็จได้ด้วยดี โดยได้รับความกรุณาจากคณาจารย์ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง โดยเฉพาะอย่างยิ่ง รศ.สุรพล รักวิชัย อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผศ.ดร.วราวุฒิ เถาวัลดีดา และรศ.ดร.อารีย์ วิเชียรฉาย ที่ได้ให้คำปรึกษาและแนะนำเนื้อหาที่เกี่ยวกับงานวิจัยเป็นอย่างดี ผู้วิจัยรู้สึกซาบซึ้งและกราบขอบพระคุณในความกรุณาอย่างสูง

ขอกราบขอบพระคุณอย่างสูงสำหรับกำลังใจและความช่วยเหลือเป็นอย่างดียิ่งมาตลอดจากคุณสมโภชน์ บุญสนิท และคุณวีระ ตูลาสสมบัติ ที่เป็นทั้งหัวหน้างานที่สถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติและเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ที่ได้ให้ความกรุณาเมตตา ตลอดจนคอยดูแลในเรื่องการเขียนวิทยานิพนธ์นี้จนสำเร็จ รวมทั้งดร.พีระวัฒน์ สมนึก และ ดร.พจมาน ชำนาญทัศน์ จากกรมวิทยาศาสตร์บริการ ที่ได้ให้คำแนะนำและช่วยเหลือด้วยดีตลอดมา

ขอขอบพระคุณ คุณบรรจบ สุขทัต รองผู้อำนวยการสถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติ และคุณธวัช ช่างปั้น จากบริษัทการบินไทย เมื่อปีที่แล้วที่ได้ให้คำแนะนำชี้แนวทางในการดำเนินงาน

ขอขอบคุณอย่างสุดซึ้งสำหรับน้องโก้ อาโมทย์ น้องหนอง พี่เสื่อ พี่จุ่ม น้องโอ๊ และน้องดี จาก Electro-optics laboratory (NECTEC) ที่คอยให้กำลังใจ ตลอดจนให้ความช่วยเหลือทุกสิ่งทุกอย่างจนวิทยานิพนธ์นี้สำเร็จได้ด้วยดี

ขอขอบคุณเพื่อนร่วมงานและน้องๆ พี่แดง พี่ระศักดิ์ น้องตัน น้องจูเนียร์ น้องจรัญ และน้องดี จากสถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติ ที่คอยช่วยเหลือและรับภาระกิจในงานแทนหลายอย่างในช่วงที่เตรียมสอบวิทยานิพนธ์ ขอขอบคุณเป็นอย่างยิ่ง

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ถ้ามีประโยชน์หรือมีคุณค่าต่อสังคมและประเทศชาติ ผู้วิจัยขอมอบความดีนี้แด่ บิดามารดา ที่คอยดูแลเอาใจใส่ เป็นกำลังใจและตักเตือนด้วยความรักตลอดเวลา การศึกษา และขอมอบความดีนี้แก่ผู้มีพระคุณทุกๆ ท่าน

รังสิยา วงษ์สุติน

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VIII
สารบัญรูป.....	IX
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาของงานวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	1
1.3 การดำเนินงานการวิจัย.....	2
1.4 ประโยชน์ที่ได้รับจากงานวิจัย.....	2
บทที่ 2 ความรู้พื้นฐานของวิธีการวัดความดัน.....	3
2.1 บทนำ.....	3
2.2 หลักการวัดความดัน.....	4
2.3 สรุป.....	5
บทที่ 3 ระบบการวัดความดัน.....	6
3.1 ชนิดของความดัน.....	6
3.2 รูปแบบการวัดความดัน.....	7
3.3 ระบบการวัดความดันทางกล.....	8
3.3.1 แบบใช้ความสมดุลย์ของของไหล.....	8
3.3.2 แบบใช้ความสมดุลย์ของแรง.....	17
3.3.3 แบบใช้หลักการของความยืดหยุ่น.....	21
3.4 ระบบการวัดความดันทางไฟฟ้า.....	23

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.4.1 แบบด้านทานไฟฟ้า.....	23
3.4.2 แบบความเหนียวนำ.....	24
3.4.3 แบบความจุไฟฟ้า.....	25
3.5 ระบบการวัดความดันทางไฟฟ้า.....	23
3.4.1 แบบด้านทานไฟฟ้า.....	23
3.4.2 แบบความเหนียวนำ.....	24
3.4.3 แบบความจุไฟฟ้า.....	25
3.5 ระบบการวัดสัญญาณภาค.....	26
3.5.1 ระบบการวัดทางกล.....	26
3.5.2 ระบบการวัดทางไฟฟ้า.....	27
3.6 ระบบการวัดความดันแตกต่าง.....	27
3.6.1 ระบบนิวมेटริก.....	28
3.6.2 ระบบไฟฟ้า.....	29
3.6 สรุป.....	30
บทที่ 4 การประเมินและแสดงค่าความไม่แน่นอนของผลการวัด.....	31
4.1 บทนำ.....	31
4.2 แนวคิดในการประเมินความไม่แน่นอน.....	31
4.3 รูปแบบในกระบวนการวัด.....	32
4.4 ขั้นตอนการประเมินความไม่แน่นอน.....	33
4.4.1 การประเมินค่าความไม่แน่นอนมาตรฐาน Type A.....	33
4.4.2 การประเมินค่าความไม่แน่นอนมาตรฐาน Type B.....	35
4.4.3 ความไม่แน่นอนมาตรฐานรวม.....	37
4.4.4 ความไม่แน่นอนขยาย.....	38
4.5 การรายงานความไม่แน่นอน.....	39
4.5 สรุป.....	39

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 5 ขั้นตอนในการดำเนินงานวิจัย.....	40
5.1 การออกแบบเครื่องวัดความดัน.....	40
5.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในระบบ.....	41
5.2.1 ส่วนที่ 1 โครงสร้างหลักเพื่อบรรจุปรอท.....	41
5.2.2 ส่วนที่ 2 ระบบทางแสง.....	41
5.2.3 ส่วนที่ 3 การประมวลผลข้อมูลทางคอมพิวเตอร์.....	43
5.3 การทำงานของระบบ.....	46
5.4 วิธีของไมเคิลสัน อินเทอร์เฟอโรมิเตอร์.....	47
5.5 การทดสอบระบบ	49
5.6 สรุป.....	50
บทที่ 6 ผลการวิจัย	51
6.1 ผลการทดสอบระบบรวม.....	51
6.2 สรุปและอภิปรายผล.....	57
บทที่ 7 บทสรุปและการประยุกต์ใช้งาน.....	58
7.1 บทสรุป.....	58
7.2 ปัญหาที่เกิดขึ้น.....	59
7.3 แนวทางในการพัฒนาต่อไป.....	59
7.4 การประยุกต์ใช้งาน.....	60
เอกสารอ้างอิง.....	61
ภาคผนวก ก. การสอบย้อนกลับของการวัดความดัน.....	63
ภาคผนวก ข. ระบบหน่วยระหว่างชาติ.....	65
ภาคผนวก ค. แสดงความสัมพันธ์ของหน่วยวัดความดันในระบบ SI.....	70

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
ภาคผนวก ง. ตารางค่าแฟกเตอร์ในการแปลงหน่วยทางด้านความดัน.....	72
ภาคผนวก จ. แสดงค่าความดันต่างๆ ในธรรมชาติ.....	75
ภาคผนวก ฉ. ค่าความหนาแน่นของปรอทที่อุณหภูมิต่างๆ.....	77
ภาคผนวก ช. ข้อกำหนดทางเทคนิคของเลเซอร์ไดโอด.....	79
ภาคผนวก ซ. ข้อมูลจำเพาะของฟิโนไฟโตไดโอดรุ่น BPW21.....	81
ภาคผนวก ฌ. โปรแกรมในการวัดระยะและคำนวณผลความดัน.....	83
ภาคผนวก ฉ. รายงานผลการวัดค่าอัตราเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก (g) จากกรมแผนที่ทหาร กองบัญชาการทหารสูงสุด.....	87
ประวัติผู้เขียน.....	89



สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
6.1 แสดงผลการวัดที่ความดัน 15 K Pa.....	53
6.2 แสดงผลการวัดที่ความดัน 25 K Pa.....	54
6.3 แสดงผลการวัดที่ความดัน 40 K Pa.....	55
6.4 แสดงผลการวัดที่ความดัน 50 K Pa.....	56
ข.1 แสดงหน่วยฐาน.....	66
ง.1 แสดงค่าแฟกเตอร์ในการแปลงหน่วยทางด้านความดัน.....	73
จ.1 แสดงค่าความหนาแน่นของปรอทที่อุณหภูมิต่างๆ.....	78



สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 แสดงองค์ประกอบพื้นฐานของการวัด.....	3
2.2 แสดงระบบการวัดความดันด้วยวิธีทางแสง.....	5
3.1 แสดงลักษณะของมาโนมิเตอร์รูปตัว ยู.....	9
3.2 แสดงมาโนมิเตอร์รูปตัว ยู ที่ใช้ในงานอุตสาหกรรม.....	10
3.3 แสดงมาโนมิเตอร์รูปตัว ยู ที่มีการชดด้วยของเหลวอีกชนิดหนึ่ง.....	11
3.4 แสดงมาโนมิเตอร์รูปตัว ยู ที่มีปลายข้างหนึ่งปิด.....	12
3.5 แสดงมาโนมิเตอร์แบบ เวล ไทยป์.....	14
3.6 แสดงมาโนมิเตอร์แบบท่อเอียง.....	16
3.7 แสดงมาโนมิเตอร์แบบใช้แรงสมดุลย์.....	18
3.8 แสดงหลักการของมาโนมิเตอร์แบบระฆัง.....	19
3.9 แสดงโครงสร้างของเครื่องมือวัดความดันแบบ บูร์ดอง.....	21
3.10 แสดงหลักการทำงานของไดอะแฟรม.....	22
3.11 แสดงการวัดความดันแตกต่างด้วยสเตรน เกจ.....	23
3.12 แสดงการวัดความดันด้วยความต้านทาน.....	24
3.13 แสดงการวัดความดันด้วย LVDT และไดอะแฟรม.....	24
3.14 แสดงการตรวจวัดความดันโดยใช้การเปลี่ยนค่าความจุไฟฟ้า.....	25
3.15 แสดงหลักการทำงานของ Flapper-nozzle transmitter.....	28
3.16 แสดงการวัดความดันแตกต่างโดยใช้ Flapper-nozzle.....	29
5.1 แสดงองค์ประกอบรวมของชุดเครื่องวัดความดันมาตรฐานที่สร้างขึ้น.....	40
5.2 แสดงวงจรขับไดโอดเลเซอร์.....	42
5.3 แสดงการไบอัสให้พินโฟโตไดโอด.....	44
5.4 แสดงการไหลของอิเล็กตรอนในรอยต่อของพินโฟโตไดโอด.....	44
5.5 แสดงรูปแบบการใช้งานของพินโฟโตไดโอด.....	45
5.6 แสดงอินเตอร์เฟสการ์ด (ET-DIO CARD).....	46
5.7 แสดงการจัดอุปกรณ์ด้วยวิธีไมเคลสัน อินเตอร์เฟอโรมิเตอร์.....	47
5.8 แสดงอุปกรณ์รวมที่ใช้ในระบบ.....	49

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
6.1 แสดงการทดสอบในการวัดค่าความดัน.....	51
6.2 แสดงผลของการวัดค่าความดันจากงานวิจัย เมื่อเริ่มต้น.....	52
6.3 แสดงผลของการวัดค่าความดันจากงานวิจัย เมื่อมีการป้อนค่าความดัน.....	52
6.4 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความดัน กับระยะผลต่างของลำปรอทที่ 15 K Pa.....	53
6.5 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความดัน กับระยะผลต่างของลำปรอทที่ 25 K Pa.....	54
6.6 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความดัน กับระยะผลต่างของลำปรอทที่ 40 K Pa.....	55
6.7 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความดัน กับระยะผลต่างของลำปรอทที่ 50 K Pa.....	56
6.8 แสดงความเป็นเชิงเส้นของค่าความดันที่วัดได้.....	57
ก.1 แสดงการสอบย้อนกลับของการวัดความดัน.....	64
ค.1 แสดงความสัมพันธ์ของหน่วยวัดความดันในระบบ S-I.....	71
จ.1 แสดงค่าความดันต่างๆ ในธรรมชาติ.....	76
ช.1 แสดงรูปลักษณะของพินไฟโตไฮโดด.....	82

บทที่ 1

บทนำ

ในบทนี้จะกล่าวถึงความเป็นมาของการดำเนินการวิจัย วัตถุประสงค์ของงานวิจัย วิธีการและขั้นตอนในการดำเนินงานวิจัย ตลอดจนประโยชน์ที่ได้รับจากงานวิจัยนี้ โดยจะกล่าวเป็นลำดับหัวข้อดังต่อไปนี้

1.1 ความเป็นมาของงานวิจัย

ความดันจะมีความหมายที่เป็นประโยชน์ก็ต่อเมื่อสามารถวัดได้ มาตรฐานของความดันนับได้ว่าเป็นพื้นฐานหลักที่สำคัญของเครื่องมือวัดความดันทุกชนิด เครื่องมือวัดความดันมาตรฐานชั้นปฐมที่สร้างขึ้นนี้เป็นชนิดมาโนมิเตอร์ ที่ใช้หลักการของ Interferometric mercury barometer [1,4] โดยที่เครื่องวัดความดันนั้นจะมีอยู่หลายรูปแบบตามจุดประสงค์ ได้แก่ แบบที่แสดงค่าความดัน แบบบันทึกค่าความดัน แบบควบคุมความดัน และแบบวัดความดันเพื่อรักษาความปลอดภัย เป็นต้น และเนื่องจากเครื่องมือวัดความดันมีหลายแบบ ความละเอียดถูกต้องก็มีหลายระดับ แต่ถึงอย่างไรก็ตาม เนื่องจาก ความดันเป็นหน่วยอนุพันธ์ ซึ่งประกอบด้วยหน่วยมูลฐาน 3 หน่วย คือ มวล (Mass) ความยาว (Length) และเวลา (Time) [2-5] ทำให้เครื่องมือวัดความดันทุกชนิดเมื่อสอบกลับมาแล้ว สุดท้ายจะมายังหน่วยมูลฐานทั้ง 3 ปริมาณดังกล่าว

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

ในสภาวะเศรษฐกิจของประเทศเช่นนี้ การที่จะสั่งซื้อเครื่องมือจากต่างประเทศเข้ามานั้นเป็นการสิ้นเปลือง ประกอบกับความจำเป็นในการสอบเทียบเครื่องมือวัดความดันของโรงงานอุตสาหกรรม และหน่วยงานอื่นๆ ที่เกี่ยวข้อง มีมาก ดังนั้นการสร้างเครื่องมือดังกล่าวขึ้นเอง จึงนับได้ว่าเป็นการแก้ปัญหาส่วนหนึ่ง ทั้งนี้ถ้าเราสามารถยืนยันผลการสอบเทียบของปริมาณพื้นฐาน ในค่าความถูกต้องที่มั่นใจในแต่ละระดับได้อย่างแม่นยำ

การศึกษาและการวิจัยนี้จึงเป็นจุดเริ่มต้นของการพัฒนาเทคโนโลยีทางด้านมาตรวิทยา ในแขนงของด้านความดัน เพื่อเป็นแนวทางในการออกแบบและพัฒนาเครื่องมือให้สามารถสอบเทียบยังเครื่องมือในระดับใช้งาน (Working) ได้ต่อไป

1.3 การดำเนินงานวิจัย

การดำเนินการวิจัยและศึกษาเพื่อสร้างเครื่องมือวัดความดันมาตรฐานขั้นปฐมนี้ ใช้หลักการ Interferometric mercury barometer โดยวัดเป็นความดันเกจ ด้วยความสัมพันธ์ของความหนาแน่นของปรอท ค่าแรงโน้มถ่วงของโลก และผลต่างของระดับความสูงของลำปรอท ในหลอดแก้ว ทั้งสองด้าน ทั้งนี้ 3 ปริมาณดังกล่าวได้รับการสอบเทียบเพื่อยืนยันค่าที่ถูกต้องพร้อมกับค่าความไม่แน่นอน

โดยที่ในการหาค่าความหนาแน่นของปรอทใช้หลักการของการตรวจสอบและสอบเทียบด้วยวิธีการ เปรียบเทียบมวลของปรอทกับน้ำบริสุทธิ์ที่ 20°C ในปริมาตรที่เท่ากัน ขวดที่บรรจุได้รับการสอบเทียบในด้านของปริมาตร [13] และความถูกต้องของเครื่องชั่งที่ใช้ได้รับการสอบเทียบจากมวลมาตรฐาน ซึ่งสอบย้อนกลับไปยังสถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติประเทศเยอรมัน (PTB) [14] สำหรับค่าแรงโน้มถ่วงของโลกนั้นใช้ค่าที่ได้จากการวัดของกรมแผนที่ทหาร ส่วนระยะความสูงที่แตกต่างกันของลำปรอททั้งสองด้านนั้นใช้ หลักการของแสงในปรากฏการณ์แทรกสอดโดยใช้วิธี Michelson Interferometric [1-2] โดยใช้แหล่งกำเนิดแสงให้แสงผ่านอุปกรณ์ผลึกรวมและแยกแสง (Beamsplitter) แนวน้ำแสงแยกเป็น 2 ลำ ในลำแสงแรกนั้นไปแนวตั้งฉากกับแนวเดิมไปยังกระจกแล้วสะท้อนกลับ อีกแนวหนึ่งผ่านไปยังกระจกที่ผิวของลำปรอท และสะท้อนกลับ แนวน้ำแสงที่สะท้อนกลับของทั้งสองลำเกิดการแทรกสอด แล้วตกลงบนอุปกรณ์รับแสง (Photodetector) เพื่อทำการจับกำลังของแสงและตรวจนับรั้วรอยของการแทรกสอด (Fringe) แล้วนำมาวิเคราะห์ประมวลผล ทำให้ทราบในเทอมของระยะทางออกมา จากนั้นเป็นขั้นตอนประมวลผลทางคอมพิวเตอร์ เพื่อให้ได้ค่าความดันเกจ เปรียบเทียบค่าที่ได้กับค่าความดันที่อ่านได้ของเครื่องมือวัดความดันที่ต้องการสอบเทียบ (Unit under test) พร้อมทั้งค่าความไม่แน่นอนจากการสอบเทียบ

1.4 ประโยชน์ที่ได้รับจากงานวิจัย

เป็นต้นแบบของการสร้างเครื่องมือวัดความดันมาตรฐานขั้นปฐมในช่วงความดันที่วัดกว้างขึ้น และมีค่าความแม่นยำที่ดีขึ้น อีกทั้งยังเป็นแนวทางในการส่งเสริมและพัฒนาเทคโนโลยีทางด้านมาตรวิทยาในแขนงของด้านความดัน ให้เป็นที่ยอมรับระหว่างชาติต่อไป

บทที่ 2

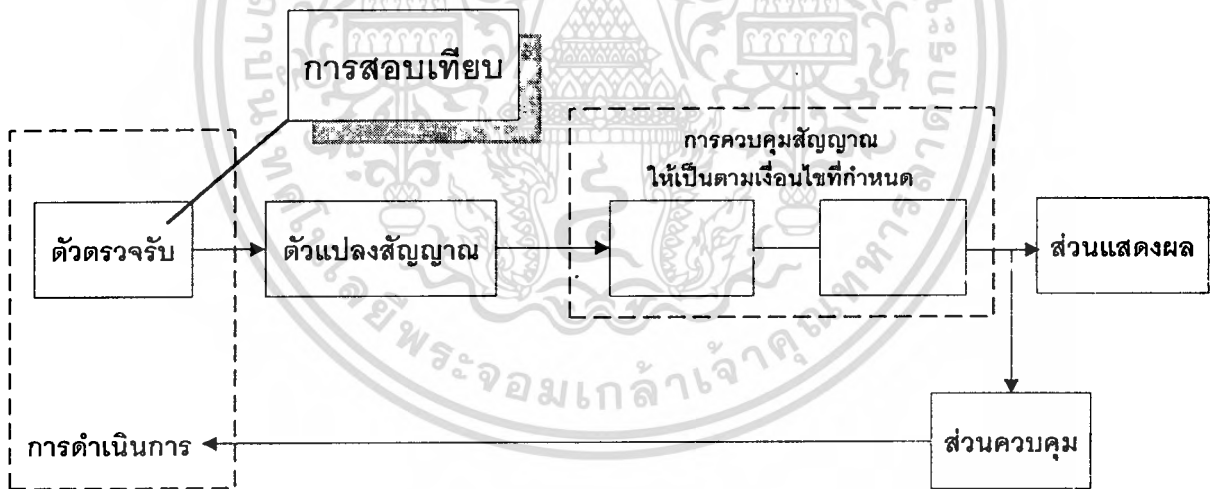
ความรู้พื้นฐานของวิธีการวัดความดัน

ในบทนี้เป็นการกล่าวถึงความรู้พื้นฐานโดยทั่วไปของระบบการวัดทางมาตรวิทยาและการสอบเทียบด้านความดัน

2.1 บทนำ

การวัดเป็นการระบุค่าของปริมาณทางกายภาพโดยทั่วไปแล้วนั้นระบบพื้นฐานของการวัดจะมีองค์ประกอบเป็น 4 ส่วน [15] แสดงดังรูปที่ 2.1 ด้วยกัน ได้แก่

1. ส่วนของตัวตรวจรับ (Sensor transducer stage)
2. ส่วนของการควบคุมสัญญาณให้เป็นตามเงื่อนไขที่กำหนด (Signal condition stage)
3. ส่วนของผลที่ออกมา (Output stage)
4. ส่วนของการควบคุมและการย้อนกลับ (Feedback control stage)



รูปที่ 2.1 แสดงองค์ประกอบพื้นฐานของการวัด

ส่วนของอุปกรณ์ตัวตรวจรับนั้นเป็นตัวหลักที่จะทำการวัดปริมาณหรือตัวแปรทางกายภาพนั้นๆ ด้วยการแปลงเป็นสัญญาณต่างๆ ที่เหมาะสม ไม่ว่าจะเป็นทางไฟฟ้า ทางกล หรือทางแสง ก็ตาม ดังนั้นในส่วนนี้นั้นจึงจำเป็นที่จะต้องยืนยันความถูกต้องของการตรวจรับด้วยการสอบเทียบ (Calibration) สำหรับในส่วนของการควบคุมสัญญาณให้เป็นตามเงื่อนไขที่กำหนดนั้นก็เพื่อที่จะแปลง ขยาย หรือตัดทอน ให้เป็นสัญญาณที่เหมาะสม สำหรับง่ายที่จะบอกถึงความแตกต่างแล้วสามารถที่จะแปลงย้อนเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กลับดั้งเดิมได้ จากนั้นจะเป็นส่วนของผลที่ออกมา ทั้งนี้ก็เพื่อที่จะระบุค่าของการวัด ด้วยวิธีที่เหมาะสม เช่น แสดงค่าออกมาทางตัวเลข หรือชี้ค่าที่ตำแหน่ง เป็นต้น ในส่วนสุดท้ายของระบบพื้นฐานของการวัด นั่นก็คือส่วนของการควบคุมระบบดังกล่าวทั้งหมด ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับการออกแบบของระบบว่าจะใช้ตัวแปรใดที่เหมาะสมในการควบคุมระบบ เช่น อุณหภูมิ ความร้อน เป็นต้น

ในงานอุตสาหกรรมการผลิต และอุตสาหกรรมกระบวนการนั้น ความดันจะมีความหมายที่เป็นประโยชน์ก็ต่อเมื่อสามารถวัดได้ มาตรฐานความดันจึงเป็นพื้นฐานในการวัดความดันทั้งหมด ดังนั้น การสอบเทียบเครื่องมือวัดความดันในโรงงานอุตสาหกรรม โดยเฉพาะอย่างยิ่งอุตสาหกรรมเทคโนโลยีขั้นสูง จึงเป็นสิ่งที่จำเป็นอย่างยิ่ง

2.2 หลักการวัดความดัน

การวัดความดัน [3-7] กระทำครั้งแรกโดย โทริซิลลี (Torricelli) ในปี คริสต์ศักราช 1643 โดยทำการคว่ำหลอดที่บรรจุปรอทลงในอ่างปรอท แล้ววัดความดันบรรยากาศจากความสูงของปรอทในหลอดแก้วที่สูงจากผิวปรอทในอ่าง ต่อมาในปีคริสตศักราช 1647 ปาสคาล (Pascal) ได้พบอุปกรณ์ที่ใช้วัดความดันเช่นกัน ที่รู้จักกันในชื่อ บารอมิเตอร์ (Barometer) และในปีคริสตศักราช 1660 บอยล์ (Boyle) ได้ค้นพบความสัมพันธ์ที่ว่า

$$PV = \text{Constant} \quad (2.1)$$

เมื่อ P เป็นความดัน

V เป็นปริมาตรของแก๊สหรือของเหลว ที่อุณหภูมิคงที่

ต่อมาในปีคริสตศักราช 1738 เบอรรูลี (Bernoulli) ได้พัฒนาทฤษฎีการชนของแก๊ส และปีคริสตศักราช 1811 อาโวกาโด (Avodadro) กล่าวว่าปริมาตรที่เท่ากันของแก๊สประกอบด้วยจำนวนโมเลกุลที่เท่ากัน ซึ่งจากข้อนี้เองทำให้ทฤษฎีจลน์ของแก๊สถูกพัฒนาขึ้นมาในกลางศตวรรษที่ 19

หลักการที่ใช้ในการวัดความดัน [9] มีอยู่ 3 หลักการ คือ

2.2.1 “ความดันของของไหล (Static fluid) จะขึ้นอยู่กับตำแหน่งที่จะพิจารณาโดยไม่ขึ้นกับทิศทาง” เป็นหลักการที่ใช้ในการวัดความดันด้วย มาโนมิเตอร์ (Manometers)

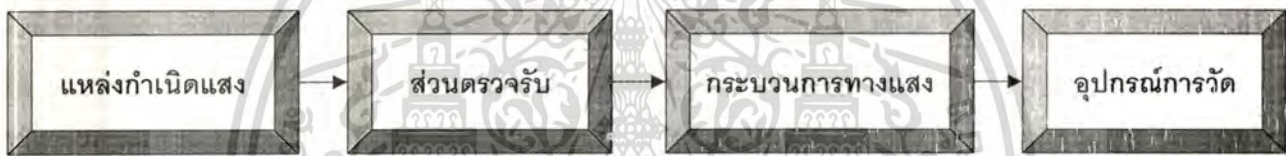
2.2.2 “ความดันจะไม่เปลี่ยนแปลงไม่ว่ารูปร่างของของไหล ที่มีความดันนั้นจะเปลี่ยนไปอย่างไร” เป็นหลักการที่ใช้ในการวัดด้วย ตัวตรวจวัดความดัน (Pressure transducers)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.3 "ความดันอันเนื่องมาจากพื้นผิวที่เคลื่อนที่ได้บนของไหล ที่อยู่ภายในที่จำกัด จะถูกส่งผ่านของไหลไปยังพื้นผิวใดๆ ได้โดยตลอด ไม่มีการลดน้อยถอยลง" เป็นหลักการที่นำไปใช้ในการวัดความดันด้วย พิสตัน เกจ (Piston gauges)

การวัดความดันสามารถทำได้หลายวิธี วิธีหนึ่งที่เป็นเทคนิคใหม่ นั่นคือ การใช้วิธีทางแสง [1-4] วิธีนี้เป็นวิธีที่ได้รับความสนใจมากในการค้นคว้าในรอบทศวรรษนี้ วิธีทางแสงนี้มีองค์ประกอบพื้นฐานของระบบการทำงาน ดังแสดงดังรูปที่ 2.2 โดยจะมีส่วนสำคัญดังนี้

- แหล่งกำเนิดแสง (Light source)
- ส่วนตรวจจับ (Sensing unit)
- กระบวนการทางแสง (Optical processing unit)
- อุปกรณ์การวัด (Detector)



รูปที่ 2.2 แสดงระบบของการวัดความดันด้วยวิธีทางแสง

โดยข้อจำกัดของการนำไปใช้ขึ้นอยู่กับลักษณะของ แหล่งกำเนิดแสง ประสิทธิภาพของตัวกลาง การส่งผ่าน คุณสมบัติของหัววัด และยังรวมถึงส่วนของการจัดการกับสัญญาณด้วย

2.3 สรุป

ในส่วนของบทนี้ได้กล่าวถึงความรู้พื้นฐานของวิธีการวัดความดันรวมถึงหลักการของการวัดความดัน

บทที่ 3

ระบบการวัดความดัน

ในบทนี้เป็นการกล่าวถึงระบบของการวัดความดัน ได้แก่ชนิดของความดัน รูปแบบการวัดความดัน ระบบการวัดความดันทางกล ระบบการวัดความดันทางไฟฟ้า ระบบการวัดสุญญากาศ และระบบการวัดความดันแตกต่าง ดังมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

3.1 ชนิดของความดัน

การแบ่งชนิดของความดัน [10] ตามจุดอ้างอิง (Reference) ที่มีค่าเป็นศูนย์สัมบูรณ์ และความดันบรรยากาศ ณ ที่ตั้งนั้นๆ ซึ่งแบ่งออกเป็น 3 ชนิดคือ ความดันเกจ (Gauge pressure) ความดันสัมบูรณ์ (Absolute pressure) และสุญญากาศ (Vacuum)

3.1.1 ความดันเกจ

ความดันเกจ เป็นความดันที่วัดได้เหนือความดันบรรยากาศทั่วไป ค่าความดันบรรยากาศนี้คิดที่ระดับน้ำทะเลเฉลี่ย (มีค่าโดยประมาณ 1.01325 bar) และการวัดความดันทางอุตสาหกรรมส่วนใหญ่จะเป็นความดันเกจ

3.1.2 ความดันสัมบูรณ์

ความดันสัมบูรณ์ เป็นความดันที่วัดได้ทั้งหมดจากจุดอ้างอิงที่ความดันเท่ากับศูนย์ และมีความสัมพันธ์กับความดันเกจเมื่อเทียบกับความดันบรรยากาศ ณ จุดที่วัด ดังนี้

$$P_{abs} = P_g + P_{atm} \quad (3.1)$$

เมื่อ P_{abs} เป็นความดันสัมบูรณ์

P_g เป็นความดันเกจ

P_{atm} เป็นความดันบรรยากาศขณะนั้น

3.1.3 สุญญากาศ

สุญญากาศ เป็นระดับความดันที่ความดันสัมบูรณ์มีค่าต่ำกว่าความดันบรรยากาศ นั่นคือค่าความดันเกจจะมีค่าเป็นลบ (Negative pressure) โดยทั่วไปจะกำหนดค่าความดันที่เป็นลบนี้เป็นระดับความสูงของของเหลว เช่น in.H₂O หรือ mm.Hg เป็นต้น

โดยทั่วไปเราจะแบ่งระดับของสุญญากาศออกเป็น 4 ระดับคือ ระดับกลาง (Medium) ระดับค่อนข้างสูง (Medium high) ระดับสูง (High) และระดับสูงมาก (Ultrahigh)

3.1.3.1 ระดับกลาง เป็นระดับที่มีความดันระหว่าง 25 mm.Hg ถึง 736 mm.Hg

3.1.3.2 ระดับค่อนข้างสูง เป็นระดับที่มีความดันระหว่าง 1 torr ถึง 10^{-3} torr

3.1.3.3 ระดับสูง เป็นระดับที่มีค่าความดันระหว่าง 10^{-3} torr ถึง 10^{-7} torr

3.1.3.4 ระดับสูงมาก เป็นระดับที่มีค่าความดันน้อยกว่า 10^{-7} torr

3.2 รูปแบบการวัดความดัน

การวัดความดันทางอุตสาหกรรม [14,15] แบ่งออกเป็น 2 กลุ่มใหญ่ๆ คือ การวัดความดันที่ไม่แปรเปลี่ยนตามเวลา (Measurement of static pressure) และการวัดความดันที่แปรเปลี่ยนตลอดเวลา (Measurement of fluctuating pressure)

3.2.1 การวัดความดันที่ไม่แปรเปลี่ยนตามเวลา

การวัดความดันที่ไม่แปรเปลี่ยนตามเวลา เป็นการวัดความดันที่นิยมวัดกันเป็นส่วนใหญ่ รวมทั้งการวัดระดับของของเหลว และอัตราการไหลด้วย การวัดความดันแบบนี้จะอาศัยหลักของการที่ความดันของของไหลเพิ่มขึ้นสูงถึงระดับหนึ่ง แล้วจะมีค่าความดันคงที่ ณ ระดับนั้นๆ เสมอ เราอาจพิจารณาการวัดความดันแบบที่ไม่มีการเปลี่ยนแปลงตามเวลาได้หลายลักษณะ ได้แก่ การวัดความดันแตกต่าง การวัดความดันเกจ การวัดความดันสัมบูรณ์ และการวัดความดันที่ต่ำกว่าบรรยากาศหรือที่เรียกว่า สุญญากาศ

3.2.2 การวัดความดันที่แปรเปลี่ยนตลอดเวลา

การวัดความดันที่แปรเปลี่ยนตลอดเวลา เป็นการวัดความดันที่มีลักษณะไม่คงที่ มีการเพิ่มขึ้นหรือลดลงตลอดเวลา เช่น ความดันภายในกระบอกสูบของระบบการจุดระเบิดเครื่องยนต์ เป็นต้น การวัดความดันที่มีลักษณะขึ้นๆ ลงๆ ไม่คงที่นี้ เราไม่สามารถใช้เครื่องมือวัดความดันเหมือนแบบแรกได้ กล่าวคือ อุปกรณ์ที่ใช้ในการตรวจจัดการเปลี่ยนแปลงค่าความดันดังกล่าวให้เป็นสัญญาณที่จะทำการบันทึกข้อมูล แล้วจึงมาพิจารณาความหมายของข้อมูลนั้นๆ ว่า มีการเปลี่ยนแปลงลักษณะใดนั่นเอง โดยที่เราไม่สามารถจะอ่านค่าได้จากเครื่องมือวัดความดันแบบทั่วๆ ไปได้

3.3 ระบบการวัดความดันทางกล

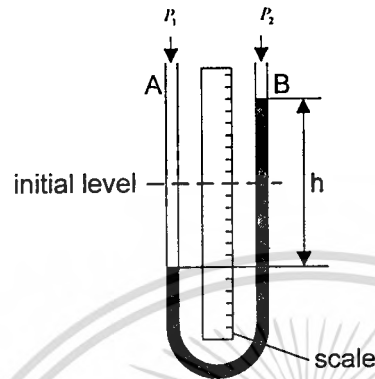
การวัดความดันด้วยวิธีทางกล [8-10] นี้ หมายถึงระบบการวัดที่ใช้อุปกรณ์ หรือเครื่องมือวัดที่ทำงานด้วยระบบเชิงกล ซึ่งระบบการวัดแบบนี้ในปัจจุบันได้เป็นที่นิยมใช้กันอย่างกว้างขวางในงานอุตสาหกรรม ส่วนใหญ่เครื่องมือวัดจะสามารถวัดได้เฉพาะความดันแตกต่าง ความดันเกจ และความดันสัมบูรณ์เท่านั้น อย่างไรก็ตามระบบการทำงานของเครื่องมือวัดความดันแบ่งออกเป็น 3 แบบคือ แบบใช้ความสมดุลย์ของของไหล (Balancing against a column of liquid) แบบใช้ความสมดุลย์ของแรง (Balancing against a known of force) และแบบใช้หลักของความยืดหยุ่น (Balancing the force in an elastic medium)

3.3.1 แบบใช้ความสมดุลย์ของของไหล

การวัดความดันโดยใช้ความสมดุลย์ของของไหลนี้ พิจารณาในด้านของความหนาแน่นของของไหล กล่าวคือ ใช้ของไหลที่มีความหนาแน่นระดับต่างๆ กัน บรรจุในภาชนะที่เป็นเครื่องมือวัดความดันได้แก่ มาโนมิเตอร์ (Manometers) เครื่องมือชนิดนี้บริษัทผู้ผลิตได้ออกแบบสร้างออกมาหลายแบบ ซึ่งแต่ละแบบจะอาศัยหลักของความสมดุลย์ของแรงโน้มถ่วง มาโนมิเตอร์ที่ใช้หลักการดังกล่าว ได้แก่ ยูทิว มาโนมิเตอร์ (U-tube manometer) เวล ไทป์ มาโนมิเตอร์ (Well-type manometer) และ อินคลินทิว มาโนมิเตอร์ (Inclined tube manometer)

3.3.1.1 ยูทิว มาโนมิเตอร์

เป็นมาโนมิเตอร์รูปตัว U ประกอบด้วย หลอดแก้วรูปตัวยู ภายในบรรจุด้วยของเหลวประมาณครึ่งหนึ่งของหลอดแก้ว (ตามปกติจะใช้น้ำสำหรับการวัดความดันที่มีค่าไม่สูงมากนัก แต่ถ้าความดันมีค่าสูงๆ จะใช้ปรอทแทน) ทั้งสองข้าง แสดงดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 แสดงลักษณะของมาโนมิเตอร์รูปตัว ยู

จากรูปจะเห็นว่าระหว่างขาของหลอดแก้วทั้งสองข้างจะมีสเกลบอกระดับความดันไว้ ซึ่งค่าความดันนี้จะเป็ค่าความดันแตกต่างระหว่างขาทั้งสองของหลอดแก้วนั้น ถ้าให้ขาหลอด A มีความดัน P_1 และขาของหลอด B มีความดัน P_2 หากความดัน P_1 ค่ามากกว่า P_2 แล้วจะทำให้ขาหลอดข้าง A มีแรงกดมากกว่าข้าง B นั่นคือ ของเหลวที่บรรจุไว้ในจะไหลไปอยู่ที่ข้าง B มากกว่า ดังนั้นแสดงว่าเกิดความดันแตกต่างขึ้นที่มาโนมิเตอร์ และคำนวณหาค่าของความดันแตกต่างนี้ได้เป็น

$$P_1 - P_2 = g \cdot h (\rho_2 - \rho_1) \quad (3.2)$$

- เมื่อ P_1, P_2 เป็นความดันสัมบูรณ์
 h เป็นระดับความสูงของของเหลวที่ต่างกัน
 g เป็นความเร่งโน้มถ่วง
 ρ_1 เป็นความหนาแน่นของของไหลเหนือของเหลว
 ρ_2 เป็นความหนาแน่นของของเหลวในมาโนมิเตอร์

ตามปกติ ใช้มาโนมิเตอร์วัดความดันในบรรยากาศปกติ นั่นคือค่าของ $\rho_1 \ll \rho_2$ จะได้

$$P_1 - P_2 = \rho \cdot g \cdot h \quad (3.3)$$

เมื่อ ρ เป็นความหนาแน่นของของเหลวในมาโนมิเตอร์
 P_2 เป็นความดันบรรยากาศปกติ

การวัดความดันโดยใช้มาโนมิเตอร์รูปตัว ยู นี้ พิสัยของความดันที่สามารถจะวัดได้เป็น 0-162,000 N/m² หรือ 0-162 kPa หรือ 0-30 psi และสามารถวัดความแตกต่างของความสูงได้ระหว่าง 10×10^{-3} m.H₂O และ 0-1.25 m.Hg

ในทางอุตสาหกรรม ใช้มาโนมิเตอร์วัดความดันที่มีค่าสูงกว่านี้ได้ แสดงหลักการดังรูปที่ 3.2 จะเห็นว่า ขาทั้งสองข้างของมาโนมิเตอร์จะมีขนาดไม่เท่ากัน นั่นคือความดัน P_2 จะมีค่าน้อยกว่า P_1 ทั้งนี้เนื่องจากด้าน P_1 มีพื้นที่หน้าตัดเล็กกว่าด้าน P_2 นั่นเอง



รูปที่ 3.2 แสดงมาโนมิเตอร์รูปตัว ยู ที่ใช้ในงานอุตสาหกรรม

จากรูป ความดันแตกต่างจะเป็น

$$P_1 - P_2 = \rho \cdot g \cdot H = \rho \cdot g \cdot (h + d) \quad (3.4)$$

เมื่อ H เป็นระดับความสูงที่ต่างกันทั้งหมด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

h เป็นระดับความสูงที่ต่างกันระหว่างระดับของเหลวข้างพื้นที่ A_1 กับระดับอ้างอิง

d เป็นระดับความสูงที่ต่างกันระหว่างระดับของเหลวข้างพื้นที่ A_2 กับระดับอ้างอิง

แต่ปริมาตรของขาทั้งสองข้างของมาโนมิเตอร์จะต้องเท่ากัน นั่นคือ

$$A_1 \cdot h = A_2 \cdot d \quad (3.5)$$

ดังนั้น

$$h = A_2 \cdot d / A_1 \quad (3.6)$$

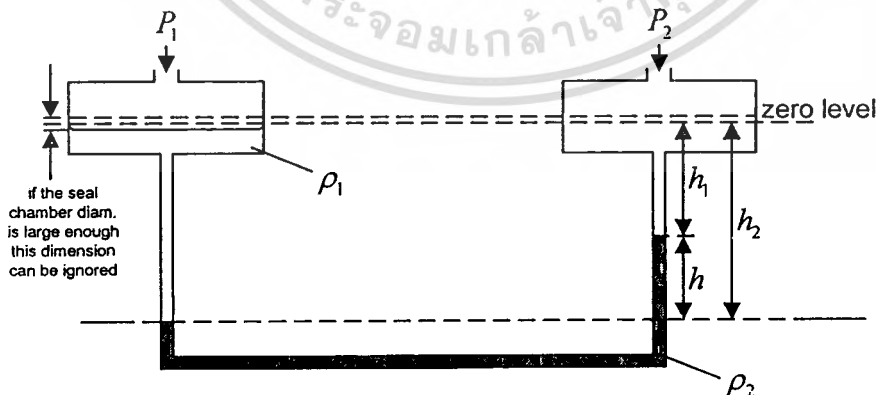
จากสมการ (3.5) และ (3.6) จะได้

$$P_1 - P_2 = \rho \cdot g \cdot d \left(1 + \frac{A_2}{A_1}\right) \quad (3.7)$$

หรือ

$$d = \frac{P_1 - P_2}{\rho \cdot g \left(1 + \frac{A_2}{A_1}\right)} \quad (3.8)$$

การวัดความดันโดยใช้มาโนมิเตอร์รูปตัว ยู นั้น บางครั้งเราต้องการวัดความดันของของเหลวชนิดอื่นที่ไม่ใช่ของเหลวที่บรรจุในมาโนมิเตอร์ เราก็สามารถกระทำได้โดยการเติมของเหลวอีกชนิดหนึ่งที่ทำหน้าที่เป็นการซีล (Seal liquid) หรือแยกระหว่างของเหลวทั้งสองชนิดดังกล่าวด้วย แลแดงหลักการดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 แสดงมาโนมิเตอร์รูปตัว ยู ที่มีการซีลด้วยของเหลวอีกชนิดหนึ่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตามรูปที่ 3.3 เมื่อระบบอยู่ในสภาวะสมดุล จะได้

$$P_1 + \rho_1 \cdot g \cdot h_2 = P_2 + \rho_1 \cdot g \cdot h_1 + \rho_2 \cdot g \cdot h \quad (3.9)$$

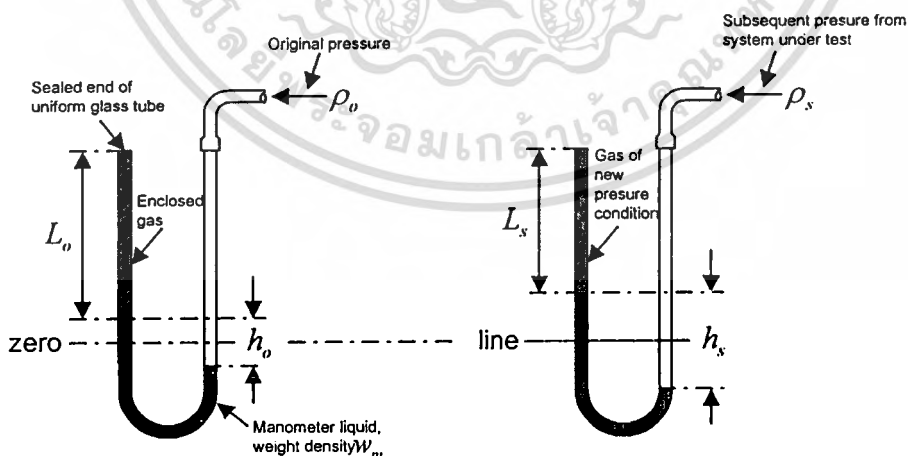
$$P_1 - P_2 = \rho_1 \cdot g(h_1 - h_2) + \rho_2 \cdot g \cdot h \quad (3.10)$$

$$h_2 - h_1 = -h \quad (3.11)$$

$$P_1 - P_2 = -\rho_1 \cdot g \cdot h + \rho_2 \cdot g \cdot h \quad (3.12)$$

$$P_1 - P_2 = (\rho_2 - \rho_1)g \cdot h \quad (3.13)$$

เนื่องจากการวัดความดันโดยใช้มาโนมิเตอร์รูปตัว ยู ที่มีปลายเปิดทั้งสองข้างนั้น บางกรณีจะพบปัญหาเกี่ยวกับการวัดความดันที่มีค่ามาก ๆ ซึ่งปลายหลอดด้านใดด้านหนึ่งของมาโนมิเตอร์จะต้องมีความยาวมากกว่าปกติ ดังนั้นเพื่อแก้ปัญหาดังกล่าว จึงใช้วิธีปิดปลายข้างหนึ่ง แต่อีกข้างหนึ่งเปิดไว้ โดยที่ช่องว่างระหว่างปลายข้างปิด และของเหลวในมาโนมิเตอร์อาจเป็น ลูญญากาศ หรือบรรจุก๊าซบางอย่างไว้ก็ได้ แสดงดังรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 แสดงมาโนมิเตอร์รูปตัว ยู ที่มีปลายข้างหนึ่งปิด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตามรูปที่ 3.4 (ก) แสดงสภาวะปกติของมาโนมิเตอร์ จะพบว่าความดันของอากาศหรือก๊าซภายในท่อข้างปิดจะมีค่าเป็น

$$P_1 = P_0 \pm \rho \cdot g \cdot h \quad (3.14)$$

ในที่นี้ ρ เป็นความหนาแน่นของของเหลวในมาโนมิเตอร์
ขณะเดียวกันปริมาตรของอากาศหรือก๊าซจะมีค่าเป็น

$$V_0 = L_0 \cdot A \quad (3.15)$$

เมื่อ L_0 เป็นความยาวของก๊าซภายในท่อปิด
 A เป็นพื้นที่หน้าตัดของท่อ

ตามรูปที่ 3.4 (ข) แสดงสภาวะที่ความดันของด้านปลายเปิดมีการเปลี่ยนแปลงความดันจาก P_0 ไปเป็น P_s ดังนั้นปริมาตรของก๊าซภายในท่อปลายปิดจะกลายเป็น

$$V = L_s \cdot A \quad (3.16)$$

จากกฎของบอยล์ที่กล่าวว่า ผลคูณของความดันและปริมาตรจะมีค่าคงที่ นั่นคือ

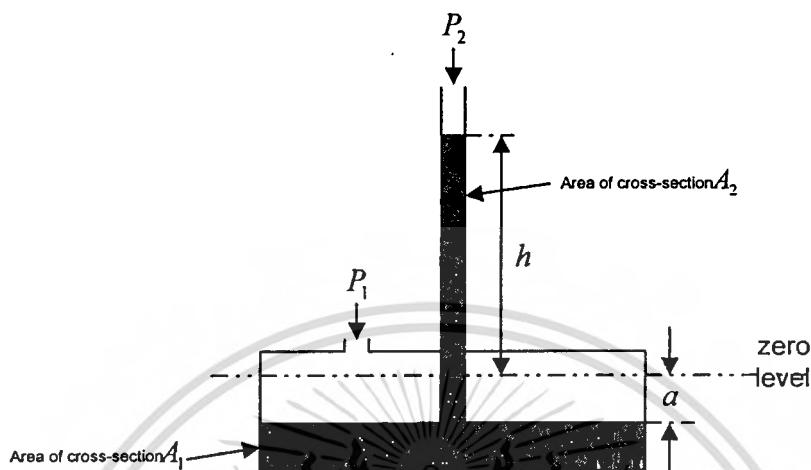
$$P_1 \cdot L_0 \cdot A = P_s \cdot L_s \cdot A \quad (3.17)$$

$$P_s = P_1 \cdot \frac{L_0}{L_s} \quad (3.18)$$

ในที่นี้ P_1 เป็นความดันบรรยากาศ

3.3.1.2 เวล ไทป์ มาโนมิเตอร์

เวล ไทป์ มาโนมิเตอร์ เป็นมาโนมิเตอร์ที่ดัดแปลงมาจากมาโนมิเตอร์รูปตัวยู เพื่อให้สะดวกในการอ่านค่า แสดงดังรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 แสดงมาโนมิเตอร์แบบ เวล ไทป์

มาโนมิเตอร์แบบ เวล ไทป์ นี้ปลายข้างหนึ่งของหลอดแก้วจะมีขนาดใหญ่มากเมื่อป้องกันความดันให้แก่ระบบจะทำให้ปริมาตรของเหลวที่ลดลงบ่อ (Well) มีค่าเท่ากับปริมาตรของเหลวที่สูงขึ้นภายในหลอดแก้ว นั่นคือ

$$A_1 \cdot d = A_2 \cdot h \quad (3.19)$$

$$h = \frac{A_1 \cdot d}{A_2} \quad (3.20)$$

- เมื่อ A_1 เป็นพื้นที่หน้าตัดของบ่อ
 A_2 เป็นพื้นที่หน้าตัดของหลอดแก้ว
 d เป็นการเปลี่ยนแปลงความสูงของของเหลวในบ่อเมื่อมีความแตกต่างของความดัน $P_2 - P_1$
 h เป็นความสูงของของเหลวในหลอดแก้ว

ถ้าความดันที่ให้แก่มาโนมิเตอร์มีความแตกต่างกัน จะได้

$$P_1 - P_2 = \rho \cdot g \cdot (h + d) \quad (3.21)$$

จากสมการ (3.20) และ (3.21) จะได้

$$P_1 - P_2 = \rho \cdot g \cdot h \left(1 + \frac{A_2}{A_1}\right) \quad (3.22)$$

แต่ถ้า $A_2 \ll A_1$ จะได้

$$P_1 - P_2 = \rho \cdot g \cdot h \quad (3.23)$$

จากสมการ (3.22) จะพบว่าอัตราส่วนของ A_2 / A_1 จะเป็นตัวกำหนดค่าความถูกต้องในการวัด และแสดงค่าของความดันบนมาโนมิเตอร์

ตามรูปที่ 3.5 ถ้าหลอดแก้วปลายบนปิด ดังนั้นพื้นที่เหนือของเหลวภายในหลอดแก้วก็จะเต็มไปด้วยอากาศ ซึ่งค่าความดันแตกต่าง ($P_1 - P_2$) จะกลายเป็น

$$P_1 - P_2 = \rho \cdot g \cdot h \left(1 + \frac{A_2}{A_1}\right) \quad (3.24)$$

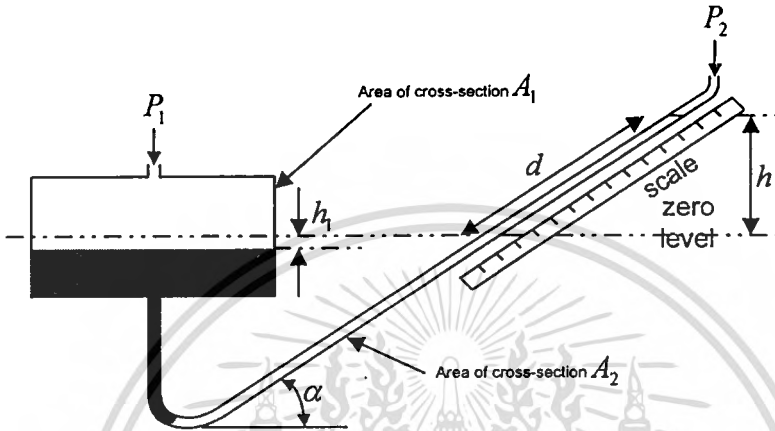
แต่ถ้า $P_2 = 0$ เนื่องจากในช่องว่างเหนือของเหลวเป็นสุญญากาศ ดังนั้น

$$P_1 = \rho \cdot g \cdot h \left(1 + \frac{A_2}{A_1}\right) \quad (3.25)$$

จากสมการ (3.25) ระดับความสูงของของเหลวภายในหลอดแก้วจะเป็นสัดส่วนกับความดัน ซึ่งค่าความดัน P_1 นี้เป็นความดันของบรรยากาศขณะนั้น

3.3.1.3 มาโนมิเตอร์ แบบท่อเอียง

มาโนมิเตอร์แบบท่อเอียงนี้ ได้รับการพัฒนามาจากมาโนมิเตอร์รูปตัวยู แต่มาโนมิเตอร์แบบนี้จะสามารถวัดความดันได้ที่ค่าต่ำๆ เท่านั้น (ไม่เกิน 10 mbar) ขณะเดียวกันสเกลการวัดจะมีความยาว และวัดค่าได้ละเอียดกว่ามาโนมิเตอร์รูปตัวยู ทั้งนี้เพราะว่าระดับความดันที่วัดและอ่านค่าได้นั้นขึ้นอยู่กับมุมเอียงของท่อ แสดงดังรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 แสดงมาโนมิเตอร์แบบท่อเอียง

ตามรูป 3.6 สามารถคำนวณค่าความดันแตกต่างของระบบได้เป็น

$$P_1 - P_2 = \rho \cdot g (h_1 + d \cdot \sin \alpha) \quad (3.26)$$

แต่

$$A_1 \cdot h_1 = A_2 \cdot d$$

ดังนั้น

$$h_1 = \frac{A_2}{A_1} \cdot d \quad (3.27)$$

นั่นคือ

$$P_1 - P_2 = \rho \cdot g \cdot d \left(\frac{A_2}{A_1} + \sin \alpha \right) \quad (3.28)$$

ถ้า $A_1 \gg A_2$ จะได้

$$P_1 - P_2 = \rho \cdot g \cdot d \sin \alpha \quad (3.29)$$

และ

$$h = d \cdot \sin \alpha \quad (3.30)$$

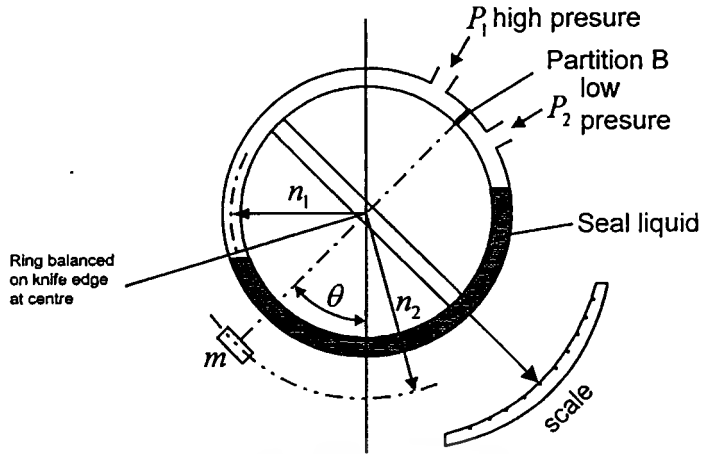
เครื่องมือวัดความดันทางกลแบบใช้ความสมดุลย์ของของไหลนี้ เมื่อนำไปใช้งานอาจเกิดปัญหาจากการอ่านค่าความดันบนสเกลได้ เพราะวาระบบของเครื่องมือวัดแบบนี้ภายในบรรจุของเหลวจำนวนหนึ่งไว้ ซึ่งของเหลวที่ใช้อาจเป็นน้ำ ปรอท หรือน้ำมันผสมที่ไม่ระเหยก็ได้ (จะต้องเป็นสารที่ไม่ทำปฏิกิริยาหรือรวมตัวกับสารที่ต้องการวัดความดัน) สิ่งต่างๆ เหล่านี้เมื่อบรรจุภายในหลอดแก้วขณะใช้งานผลของความตึงผิวของของเหลว จะทำให้เกิดความผิดพลาดขึ้น

3.3.2 แบบใช้ความสมดุลย์ของแรง

เครื่องมือวัดความดันแบบนี้จะใช้ในการวัดความดันแตกต่างที่มีค่าต่ำๆ ได้แก่ แบบใช้แรงสมดุลย์บนวงแหวน (Ring balanced) และแบบระฆัง (Bell type)

3.3.2.1 แบบใช้แรงสมดุลย์บนวงแหวน

เครื่องมือวัดแบบนี้เหมาะสำหรับที่จะใช้วัดความดันแตกต่างที่มีค่าต่ำๆ แสดงหลักการของระบบเครื่องมือวัดดังรูปที่ 3.7 ประกอบด้วยท่อวงแหวนกลม และที่จุดปลายของวงแหวนทั้งสองจะถูกปิดกั้นไม่ให้ความดันมาถึงกันได้ สำหรับภายในท่อวงแหวนบรรจุด้วยของเหลว (นิยมใช้ปรอท) และท่อวงแหวนนี้จะตั้งอยู่บนลิ้มลักษณะคล้ายคีมมีด ซึ่งทำหน้าที่เป็นจุดหมุน ส่วนด้านล่างจะถ่วงด้วยวัตถุ m และวงแหวนนี้สามารถเคลื่อนที่ได้อย่างอิสระบนคีมมีด โดยที่วงแหวนจะเริ่มหมุนไปตามทิศทางจากความดันสูงไปหาความดันต่ำ จนกว่าโมเมนต์ของแรงทั้งสองจะเกิดการสมดุลย์กัน



รูปที่ 3.7 แสดงมาโนมิเตอร์แบบใช้แรงสมดุลย์

$$\text{โมเมนต์การหมุน} = (P_1 - P_2) \cdot A \cdot r_1 \quad (3.31)$$

เมื่อ $P_1 - P_2$ เป็นความดันแตกต่างที่เกิดขึ้น
 A เป็นพื้นที่หน้าตัดของท่อวงแหวน
 r_1 เป็นรัศมีเฉลี่ยของวงแหวน

แต่ $x / r_1 = \sin \theta \quad (3.32)$

โดยที่ θ เป็นมุมที่วงแหวนเอียงไปจากแนวระนาบ
 ดังนั้น ค่าของโมเมนต์การหมุนจะกลายเป็น

$$\text{โมเมนต์การหมุน} = m \cdot g \cdot r_2 \cdot \sin \theta \quad (3.33)$$

ขณะที่ m เป็นมวลที่ใช้ถ่วง
 r_2 เป็นรัศมีของวงแหวน
 θ เป็นมุมของการหมุน
 g เป็นความเร่งโน้มถ่วง

จากสมการ (3.31) และ (3.33) จะได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$(P_1 - P_2).A.r_1 = m.g.r_2 \cdot \sin \theta \quad (3.34)$$

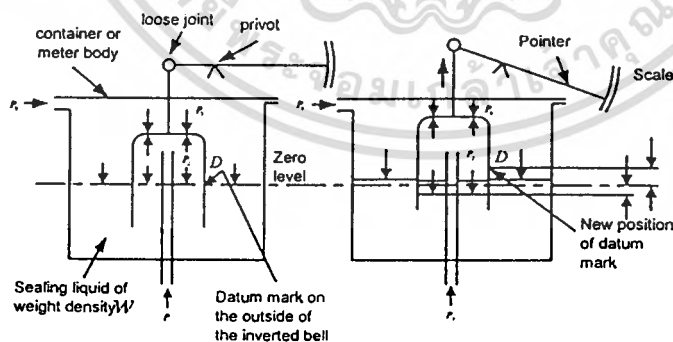
หรือ

$$P_1 - P_2 = \frac{m.g.r_2}{A.r_1} \cdot \sin \theta \quad (3.35)$$

ตามสมการ (3.35) ค่าความดันแตกต่างที่วงแหวนนี้ได้รับนี้ จะเป็นสัดส่วนกับมุมของการหมุนของวงแหวนนั้น โดยที่เครื่องมือวัดแบบนี้สามารถใช้วัดความดันที่มีพิสัยกว้างมาก (ประมาณ 0-300 mm.H₂O) ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุที่ใช้ทำวงแหวนและความหนาของวงแหวนนั้น สำหรับการใช้งานที่มีความดันสูงมากจะนิยมใช้เหล็กทำเป็นวงแหวนแทนแก้ว และของเหลวที่ใช้เติมภายในหลอดแก้วหรือเหล็กก็ตามจะนิยมใช้ปรอทมากกว่าสารชนิดอื่นๆ อย่างไรก็ตามการเลือกของเหลวชนิดใดก็ตาม สิ่งที่ต้องคำนึงถึงก็คือ เกี่ยวกับคุณสมบัติของของเหลว นั้น ซึ่งจะเป็นตัวกำหนดพิสัยการวัดความดันของเครื่องมือชนิดนี้

3.3.3.2 แบบระฆัง

เป็นมาโนมิเตอร์ที่มีรูปร่างคล้ายกับระฆัง หลักการของเครื่องมือวัดความดันแบบนี้จะอาศัยแรงที่เกิดขึ้นเนื่องจากความแตกต่างของความดันทางด้านเข้าและด้านออก โดยที่ถ้าความดันแตกต่างเป็นศูนย์ แรงพยุงของของเหลวที่ด้วยระฆังคว่ำจะสมดุลย์ และเมื่อมีความแตกต่างของความดันเกิดขึ้นจะทำให้แรงพยุงเปลี่ยนแปลงไป



รูปที่ 3.8 แสดงหลักการของมาโนมิเตอร์แบบระฆัง

จากรูปที่ 3.8 แสดงระบบการทำงานของมาโนมิเตอร์ ประกอบด้วยถ้วยที่มีลักษณะคล้ายระฆังคว่ำอยู่ในของเหลว ตามรูปภายในจะแบ่งออกเป็น 2 ส่วนคือ ส่วนที่มีความดันต่ำจะอยู่ภายนอกถ้วย และส่วนที่มีความดันสูงจะอยู่ภายในถ้วย เมื่อมีความดันแตกต่างเกิดขึ้นจะทำให้ถ้วยระฆังเคลื่อนที่ขึ้นหรือลงแล้วแต่กรณี นั่นคือ ระดับของของเหลวทั้งภายในและภายนอกถ้วยจะมีระดับแตกต่างกันด้วย เมื่อความดันภายในถ้วยมากกว่าภายนอกถ้วย ($P_2 > P_1$) จะทำให้ระดับของของเหลวภายนอกถ้วยมากกว่าภายใน ดังนั้น ถ้วยดังกล่าวก็จะลอยขึ้นไปข้างบน แต่ถ้าความดันภายนอกถ้วยมากกว่าความดันภายในถ้วย ก็จะทำให้ถ้วยนั้นเคลื่อนที่ต่ำลงจากเดิม

ถ้าให้	A_0	เป็นพื้นที่ภายนอกถ้วย ที่มีรัศมี	R_0
	A_1	เป็นพื้นที่ภายในถ้วย ที่มีรัศมี	R_1
	y	เป็นระดับที่ถ้วยเคลื่อนที่	
	m	เป็นมวลของของเหลวที่บรรจุภายในอ่าง	
	R	เป็นรัศมีของภาชนะของมาโนมิเตอร์	
	h	เป็นระดับของของเหลวภายในถ้วยที่ลดลงจากเดิม	

จากหลักของอาร์คิมิดีส (Archimedes' principle) ที่ว่าปริมาณของของเหลวที่เพิ่มขึ้นภายนอกถ้วยจะเท่ากับปริมาณของของเหลวที่หายไปจากภายในถ้วย นั่นคือ ความแตกต่างของความดันบนถ้วยจะเท่ากับการลดลงของแรงที่จะยกถ้วยขึ้นข้างบน เขียนความสัมพันธ์ได้เป็น

$$(P_2 - P_1)A_1 = A_2 \cdot m \cdot g \cdot y \quad (3.36)$$

$$y = \frac{(P_2 - P_1) \cdot A_1}{m \cdot g \cdot A_2} \quad (3.37)$$

หรือ

$$y = \frac{P_2 - P_1}{m \cdot g} \cdot \frac{R_1^2}{(R_0^2 - R_1^2)} \quad (3.38)$$

ในทางปฏิบัติความดันที่ของเหลวได้รับจะถูกจำกัดที่พิสัย เป็น

$$P_2 - P_1 = h \cdot m \cdot g \quad (3.39)$$

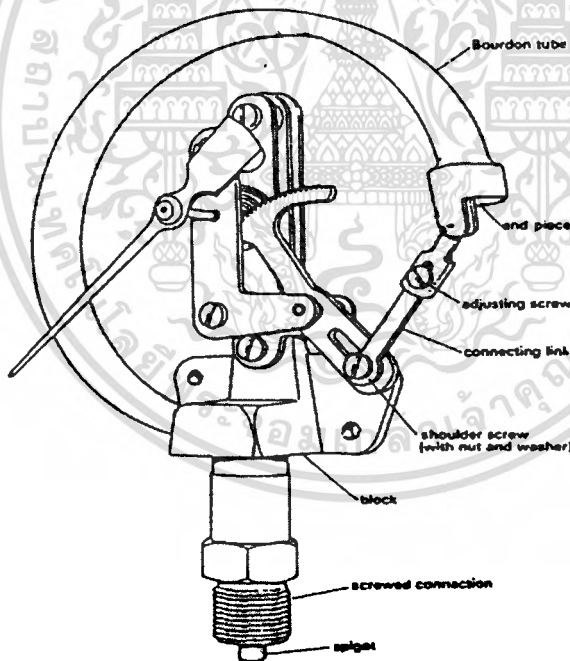
สำหรับมาโนมิเตอร์แบบระฆังนี้ เป็นที่นิยมใช้กันในโรงงานอุตสาหกรรมเหล็ก เพื่อสำหรับงานวัดและควบคุมความดันของเตาหลอมโลหะ

3.3.3 แบบใช้หลักการของความยืดหยุ่น

การวัดความดันโดยใช้หลักการของความยืดหยุ่นนี้เป็นวิธีหนึ่งในระบบการวัดความดันด้วยวิธีทางกล ซึ่งเครื่องมือวัดที่ใช้หลักการของความยืดหยุ่นได้แก่ เครื่องวัดแบบบูร์ดอง (Bourdon tube) แบบไดอะแฟรม (Diaphragm type) และแบบเบลโลว์ (Bellow type)

3.3.3.1 เครื่องวัดแบบบูร์ดอง

เป็นเครื่องวัดความดันชนิดหนึ่งที่สามารถจะวัดความดันของอากาศ หรือ สุญญากาศได้ เป็นเครื่องมือวัดความดันที่มีประสิทธิภาพสูงมาก และมีความเชื่อถือในการทำงานสูง เหมาะสมที่จะใช้งานเกี่ยวกับกลจักรไอน้ำ กระบวนการอุตสาหกรรมเคมี และงานอุตสาหกรรมอื่นๆ

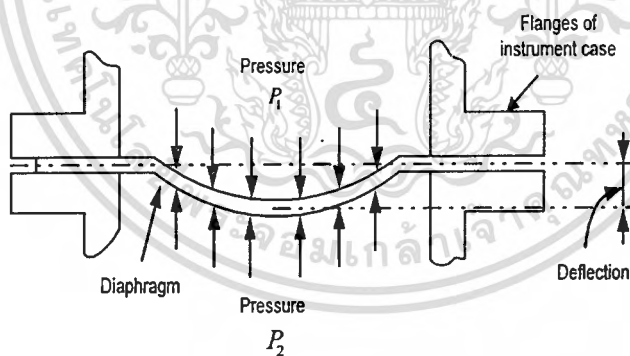


รูปที่ 3.9 แสดงโครงสร้างของเครื่องมือวัดความดันแบบ บูร์ดอง

บุร์ดอง เป็นท่อโลหะที่มีพื้นที่หน้าตัดเป็นรูปวงรี และงอขึ้นเป็นส่วนโค้งของวงกลม หรือเป็นซดที่มีปลายข้างหนึ่งปิด ขณะที่อีกปลายหนึ่งเปิดเพื่อให้ความดันที่ต้องการวัดเข้ามาภายในท่อนั้น (ที่ปลายเปิดจะถูกยึดตรึงกับที่ ส่วนปลายปิดจะขยับเคลื่อนที่ได้) หากมีความดันเข้ามาในท่อบุร์ดอง จะทำให้เกิดความเครียดขึ้นที่ท่อโลหะนี้ โดยท่อจะพยายามเหยียดตัวออกให้ตรง และทำให้ส่วนปลายปิดขยับเคลื่อนที่ไป ซึ่งการเคลื่อนที่นี้จะเป็นสัดส่วนกับความดันที่อยู่ภายในท่อ นั่นคือ เซ็มซีที่ติดอยู่บนแกนก็จะเคลื่อนที่ไปบนสเกลที่หน้าปัทม์แสดงลักษณะของบุร์ดอง ดังรูปที่ 3.9

3.3.3.2 ไดอะแฟรม

เนื่องจากลักษณะโครงสร้างของไดอะแฟรมบอบบางกว่าบุร์ดอง (อาจทำจากแผ่นโลหะหรือสารสังเคราะห์ที่มีขนาดบางมาก) ดังนั้นจึงเหมาะที่จะใช้สำหรับวัดความดันที่มีขนาดต่ำ ๆ เท่านั้น เมื่อมีความดันมากกระทำบนแผ่นไดอะแฟรมจะทำให้แผ่นไดอะแฟรมเกิดการโก่งตัวไปตามทิศทางของความดัน และทำให้เซ็มซีที่มีแกนต่อร่วมกับแกนกลางของไดอะแฟรมเคลื่อนที่ไปยังบนสเกลได้ แสดงหลักการทำงานของไดอะแฟรมและระบบการวัดแบบใช้ไดอะแฟรม ดังรูปที่ 3.10



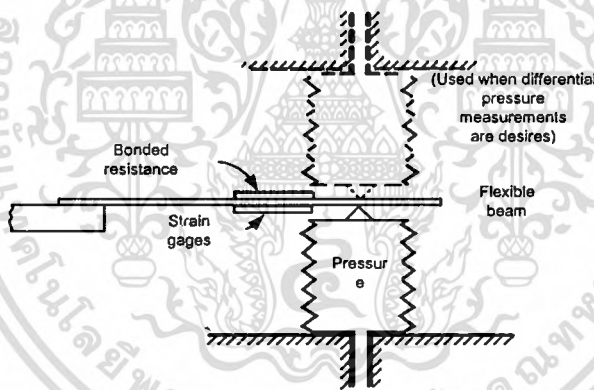
รูปที่ 3.10 แสดงหลักการทำงานของไดอะแฟรม

3.4 ระบบการวัดความดันทางไฟฟ้า

การวัดความดันทางไฟฟ้า [9-16] นี้ จะใช้หลักของการเปลี่ยนแปลงคุณลักษณะบางประการของอุปกรณ์ไฟฟ้า ได้แก่ ความต้านทาน ความเหนี่ยวนำ และความจุไฟฟ้า ซึ่งบางกรณีการวัดความดันในกระบวนการอาจใช้ทั้งระบบทางกลและทางไฟฟ้าร่วมกัน เช่น การตรวจวัดความดันจะใช้หลักการทางกล จากนั้นจึงต่อร่วมกันทางไฟฟ้า โดยใช้การเปลี่ยนความดันนั้นให้เป็นสัญญาณทางไฟฟ้าเพื่อทำการชี้แสดงค่าหรือบันทึกค่าต่อไป

3.4.1 แบบความต้านทานไฟฟ้า

อุปกรณ์ที่ใช้เป็นตัวตรวจวัดความดันโดยอาศัยการเปลี่ยนแปลงคุณลักษณะทางไฟฟ้าแบบความต้านทานนั้น ส่วนใหญ่เราจะนิยมใช้สเตรน เกจ ซึ่งเมื่อความดันเปลี่ยนแปลงจะทำให้ความเครียดบนสเตรน เกจ รูปที่ 3.11 แสดงการใช้สเตรน เกจ เพื่อวัดความดัน ประกอบด้วย เบลโลว์ 2 ตัว สำหรับวัดความดันแตกต่างกัน ($P_1 - P_2$)

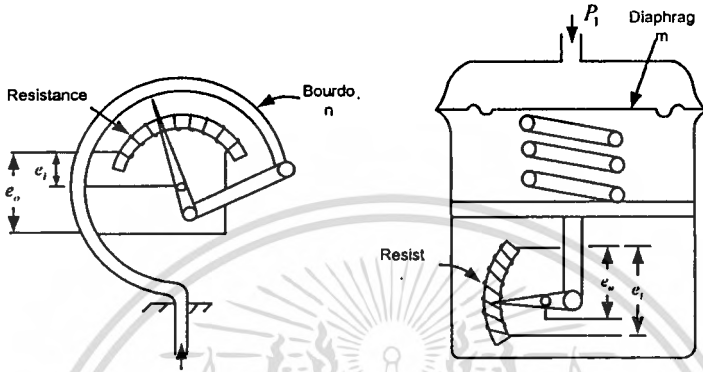


รูปที่ 3.11 แสดงการวัดความดันแตกต่างด้วยสเตรน เกจ

ขณะที่สเตรนเกจ ติดตั้งบนแผ่นชิ้น (member) ที่มีเบลโลว์ยึดติดอยู่ เมื่อมีความดันแตกต่างกันเกิดขึ้นจะทำให้เกิดการเปลี่ยนตำแหน่งจากเดิม นั่นคือ สเตรนเกจจะเกิดความเครียดขึ้น ดังนั้นเราจะสามารถวัดการเปลี่ยนแปลงความต้านทานของสเตรน เกจ ได้โดยใช้วงจรบริดจ์

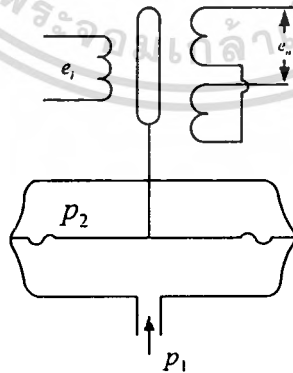
3.4.2 แบบความเหนียว

การตรวจวัดความดันโดยใช้หลักการเปลี่ยนค่าความเหนียวนี้ ประกอบด้วยส่วนสำคัญ 3 ส่วนคือ คอลลิย แกนแม่เหล็กเคลื่อนที่ได้ และอุปกรณ์ที่ทำงานด้วยความยืดหยุ่น แสดงดังรูปที่ 3.12 เนื่องจากแกนแม่เหล็กของ LVDT สามารถเคลื่อนที่ได้ และค่าแรงดันไฟฟ้าเหนียวนำก็จะมีค่าเปลี่ยนแปลงไปตามตำแหน่งของแกนเหล็ก



รูปที่ 3.12 แสดงการวัดความดันด้วยความต้านทาน

จากรูปที่ 3.13 แกนแม่เหล็กจะต่อร่วมกับไดอะเฟรม ดังนั้น เมื่อมีความดันแตกต่างกันก็ทำให้ไดอะเฟรมเคลื่อนที่ และทำให้แกนแม่เหล็กของ LVDT เปลี่ยนแปลงตำแหน่งตามไปด้วย นั่นคือค่าแรงดันไฟออก (e_0) ก็เปลี่ยนแปลง ซึ่งเราสามารถวัดค่าแรงดันไฟฟ้านี้ได้โดยกำหนดดลเกลในรูปของความดัน



รูปที่ 3.13 แสดงการวัดความดันด้วย LVDT และไดอะเฟรม

3.4.3 แบบความจุไฟฟ้า

เป็นการวัดความดันโดยใช้หลักการเปลี่ยนค่าความจุไฟฟ้าซึ่งค่าความจุไฟฟ้านี้จะสามารถเปลี่ยนแปลงได้ต้องอาศัยตัวแปร 3 ประการ คือ ขนาดพื้นที่หน้าตัดของแผ่นเพลทระยะห่างระหว่างแผ่นเพลททั้งสอง และค่าคงที่ไดอิเล็กตริกที่อยู่ระหว่างแผ่นเพลท เราอาจเขียนความสัมพันธ์ดังกล่าวได้เป็น

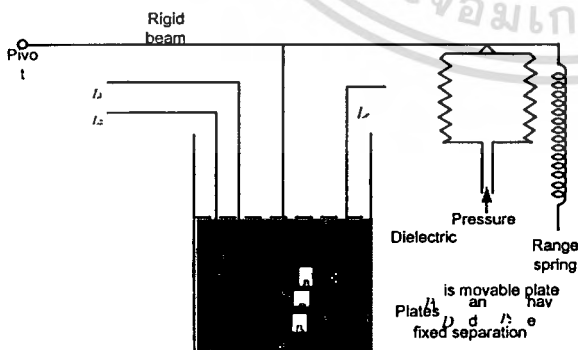
$$C = 0.0885 \cdot \epsilon \cdot \frac{A}{d} \quad (3.40)$$

- เมื่อ C เป็นค่าความจุไฟฟ้า (μF)
 ϵ เป็นค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของตัวกลาง
 A เป็นพื้นที่หน้าตัดของแผ่นเพลททั้งสอง (cm^2)
 d เป็นระยะห่างระหว่างแผ่นเพลททั้งสอง (cm)

กรณีที่ตัวเก็บประจุมีลักษณะเป็นรูปทรงกระบอก ความจุไฟฟ้าจะกลายเป็น

$$C = \frac{0.2417 \cdot \epsilon \cdot L}{\log(b/a)} \quad (3.41)$$

- เมื่อ L เป็นความยาวของทรงกระบอก (cm)
 a เป็นเส้นผ่าศูนย์กลางภายนอกของอิเล็กโทรดภายใน (cm)
 b เป็นเส้นผ่าศูนย์กลางภายในของอิเล็กโทรดภายนอก (cm)



รูปที่ 3.14 แสดงการตรวจวัดความดันโดยใช้การเปลี่ยนค่าความจุไฟฟ้า

จากรูปที่ 3.14 แสดงหลักการตรวจวัดความดันโดยใช้การเปลี่ยนค่าความจุไฟฟ้าในลักษณะการเลื่อนระยะห่างระหว่างแผ่นเพลททั้งสอง ตามรูปจะให้เพลท D และเพลท P_2 อยู่กับที่ ส่วนเพลท P_1 เคลื่อนที่ได้ตามความดันที่กระทำต่อเบลโลว์ เมื่อเบลโลว์เปลี่ยนแปลงระยะขจัดจะทำให้เพลท P_1 เคลื่อนที่ตาม นั่นคือ ระยะห่างระหว่างเพลทจะเปลี่ยนแปลง ซึ่งมีผลต่อค่าความจุไฟฟ้าด้วย จากนั้นจึงนำปลายสาย L_1 และ L_2 ไปเข้าวงจรบริดจ์ เพื่อวัดค่าความจุไฟฟ้าต่อไป ซึ่งก็จะได้อ่านค่าความดันที่ต้องการ

3.5 ระบบการวัดสุญญากาศ

สุญญากาศ (Vacuum) หมายถึง อาณาบริเวณที่ไม่มีสสารซึ่งบริเวณนี้อากาศจะถูกดูดออกจนหมด ดังนั้นความดันในบริเวณที่เป็นสุญญากาศจึงมีค่าต่ำกว่าบรรยากาศปกติสำหรับหน่วยที่ใช้วัดสุญญากาศได้แก่ inH_2O , mmHg , torr หรือ micron ก็ได้

ปัจจุบันอุตสาหกรรมหลายประเภทได้มีการใช้เทคโนโลยีของสุญญากาศอย่างมาก เช่น อุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ อุตสาหกรรมพลาสติก อุตสาหกรรมกรรมกรผลิตยา และเวชภัณฑ์ทางการแพทย์ เป็นต้น ดังนั้นจึงนับว่าบทบาทของเทคโนโลยีสุญญากาศจึงมีความสำคัญมากขึ้นทุกขณะ อนึ่งการวัดพิสัยสุญญากาศว่ามีค่าเท่าไร จึงมีความจำเป็นเช่นเดียวกัน ซึ่งระบบการวัดสุญญากาศเราอาจแบ่งออกเป็น 2 แบบคือ ระบบการวัดทางกล และระบบการวัดทางไฟฟ้า

3.5.1 ระบบการวัดทางกล

เครื่องมือที่ใช้วัดค่าความดันต่ำ ๆ หรือสุญญากาศนั้น จะมีคุณลักษณะต่างจากเครื่องมือวัดความดันที่ใช้กันโดยทั่วไป เนื่องจากระบบการวัดจะต้องไวต่อการเปลี่ยนแปลงความดันที่มีระดับต่ำ สำหรับเครื่องมือที่ใช้ในการวัดความดันที่มีค่าต่ำ ๆ ในปัจจุบัน ได้แก่ Mcleod gauge ซึ่งสามารถวัดความดันที่มีค่าระหว่าง $1 - 10^{-5}$ mmHg ตามปกติเครื่องมือวัดความดันแบบ Mcleod gauge จะใช้เป็นเครื่องมือวัดสำหรับการปรับเทียบมาตรฐานกับเครื่องมือวัดความดันชนิดอื่น ๆ เพราะว่า Mcleod gauge สามารถจะวัดความดันได้เป็นจุด ๆ ณ ระดับใดระดับหนึ่งเท่านั้น ซึ่งการนำไปใช้งานจึงไม่อาจจะวัดความดันได้โดยตรง แต่จะใช้ได้ดีเกี่ยวกับการทดสอบตัวอย่างของระบบก๊าซในสภาวะสุญญากาศ

3.5.2 ระบบการวัดทางไฟฟ้า

การวัดความดันที่มีค่าต่ำมาก ๆ หรือบริเวณที่เป็นสุญญากาศในระดับสูง (High vacuum) เครื่องมือวัดที่กล่าวมาแล้วได้แก่ McLeod gauge มาโนมิเตอร์แบบปรอท เบลโลว์หรือไดอะแฟรมก็ตามไม่สามารถจะวัดค่าความดันดังกล่าวได้ แต่วิธีการที่นิยมใช้กันจะเป็นระบบการวัดด้วยวิธีการทางไฟฟ้า ซึ่งในที่นี้จะกล่าวถึงเฉพาะแบบใช้วิธีการทางความร้อน (Thermal type) แบบใช้วิธีการแตกตัวของก๊าซ (Ionization gauge)

3.5.2.1 แบบใช้วิธีการทางความร้อน

วิธีการแบบนี้อาศัยหลักการนำความร้อนของก๊าซมาเป็นตัวตรวจสอบค่าความดันขณะนั้น กล่าวคือ ที่ความดันปกติ การนำความร้อนของก๊าซจะไม่ขึ้นกับความดันของก๊าซเลย แต่หากความดันลดลงประมาณ 1 CmHg หรือต่ำกว่าการนำความร้อนของก๊าซจะเริ่มตกลงทันที ทั้งนี้เพราะว่าจำนวนโมเลกุลของก๊าซในปริมาตรที่จำเพาะนั้น ๆ มีจำนวนน้อย และอีกกรณีหนึ่ง การชนกันระหว่างโมเลกุลต่อโมเลกุล หรือระหว่างโมเลกุลกับผนังของภาชนะที่บรรจุก๊าซมีปริมาณน้อยลงนั่นเอง ดังนั้นความดันจึงลดลง เครื่องมือวัดที่ใช้หลักการทางความร้อนอีกแบบหนึ่ง คือ เทอร์โมคัมเบิล หรือ เกจวัดสุญญากาศ

3.5.2.2 แบบใช้วิธีการแตกตัวของก๊าซ

เครื่องมือวัดแบบนี้จะมีหลักการทำงานเหมือนกับ หลอดสุญญากาศชนิดไตรโอด (Triod vacuum tube) โดยที่เมื่อมีความต่างศักย์ไฟฟ้า ในหลอดที่บรรจุก๊าซ จะพบว่าเกิดอิเล็กตรอนอิสระที่มีประจุไฟฟ้า และที่ประจุไฟฟ้านี้จะมีพลังงานจลน์ ซึ่งพลังงานจลน์นี้จะมีปริมาณเพียงพอที่จะทำให้ก๊าซเกิดการแตกตัวได้ (ประจุอิเล็กตรอนที่เกิดขึ้นไปชนกับโมเลกุลของก๊าซทำให้แตกตัวเป็นไอออน) ไอออนที่เกิดจากการแตกตัวของก๊าซจะมีการเปลี่ยนแปลงอย่างเป็นเชิงเส้นกับความดันที่เปลี่ยนไป นั่นคือ อัตราการเกิดไอออนจึงขึ้นอยู่กับกระแสอิเล็กตรอน ณ ระดับความดันต่าง ๆ

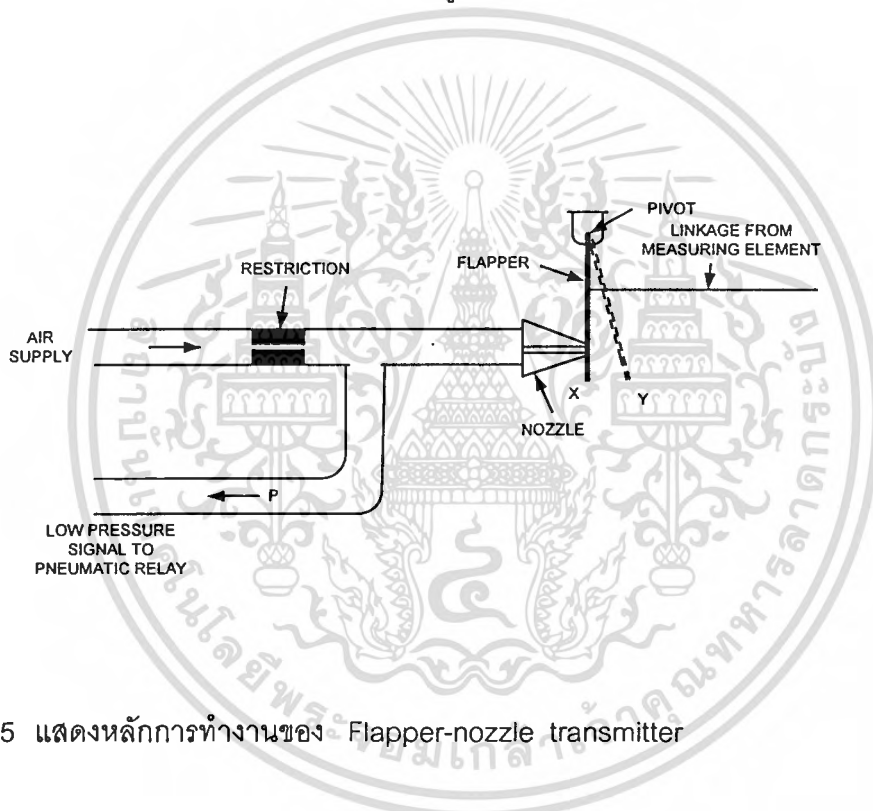
3.6 ระบบการวัดความดันแตกต่าง

การวัดความดันแตกต่าง (Differential pressure measurement) เป็นวิธีการวัดความดัน ณ จุดต่าง ๆ แบบหนึ่ง ลักษณะของระบบการวัดแบบนี้สามารถจะนำไปประยุกต์ใช้ในการวัดอัตราการไหลและการวัดระดับได้ซึ่งในงานทางอุตสาหกรรมทั่วไปได้ใช้วิธีการแบบนี้กันอย่างแพร่หลาย อย่างไรก็ตามเครื่องมือที่จะใช้ในงานดังกล่าวจะต้องมีความไวต่อการเปลี่ยนแปลงความดัน เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ต้นอย่างมาก นอกจากนี้ระบบการวัดความดันแตกต่างยังสามารถที่จะใช้เกี่ยวกับการวัดค่าตัวแปรในกระบวนการระยะไกล (Remote measurement) ได้อีกด้วย โดยที่การวัดความดันระยะไกลจะต้องมีอุปกรณ์ที่สามารถเปลี่ยนค่าความดันที่วัดได้ในตอนแรกให้เป็นสัญญาณที่ส่งไปในระยะทางไกล ๆ ได้ ปัจจุบันมีใช้ทั้งระบบนิวแมติก (Pneumatic pressure transmitter) และระบบไฟฟ้า (Electrical pressure transmitter)

3.6.1 ระบบนิวแมติก

ระบบนิวแมติก ประกอบด้วยอุปกรณ์การตรวจวัดความดันแตกต่างที่เรียกว่า Flapper nozzle transducer แสดงหลักการดังรูปที่ 3.15



รูปที่ 3.15 แสดงหลักการทำงานของ Flapper-nozzle transmitter

จากรูปที่ 3.15 ความดันลมที่จ่ายให้ระบบจะใช้ 20 psi หรือ 35 psi และความดันลมทางออกมีค่าอยู่ระหว่าง 3-15 psi (ที่ 20 psi) หรือ 6-30 psi (ที่ 35 psi) เมื่อระบบทำงานความดันลมที่จ่ายให้แก่ระบบจะพยายามทำให้แผ่น Flapper เคลื่อนที่ออกจาก Nozzle โดยที่หากแผ่น Flapper อยู่ใกล้กับ nozzle มาก ๆ ความดัน P ที่วัดได้จะมีค่าสูง และในทางตรงข้าม ถ้าแผ่น Flapper อยู่ห่างจาก Nozzle ก็จะทำให้ความดัน P มีค่าต่ำ การเคลื่อนที่ของแผ่น Flapper นี้จะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับการเปลี่ยนแปลงความดัน ซึ่งแสดงระบบการวัดความดันแตกต่างที่สมบูรณ์ ดังรูปที่ 3.16 จะเห็นว่า แผ่น Flapper จะเคลื่อนที่ออกห่างจาก Nozzle เมื่อความดันในกระบวนการมีค่ามาก นั่นคือความดัน P_i จะลดลง ขณะเดียวกันแผ่นไดอะแฟรมและวาล์ว d

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ก็จะเคลื่อนที่ลงมาปิดทางช่อง b ดังนั้นที่ช่อง a และ c ก็จะเปิดทำให้ความดัน P_s ไหลออกทางช่อง a และ c ได้ ซึ่งจะมีผลต่อความดันที่ออกทางช่อง Nozzle กล่าวคือ ความดันทางช่อง Nozzle จะลดลงและแผ่น Flapper ก็จะเข้าใกล้ช่อง Nozzle อีกครั้งหนึ่ง จากการทำงานนี้การเคลื่อนที่ของแผ่น Flapper ขึ้นอยู่กับความดันแตกต่างระหว่าง P_s และ P_i นั่นคือ

$$P_s - P_i = P_o \quad (3.42)$$

จากหลักการตามรูปที่ 3.15 และ 3.16 การวัดความดันแตกต่างและการส่งสัญญาณความดันแตกต่างไปยังหน่วยควบคุม จะอาศัยการเคลื่อนที่ของแผ่น Flapper และลมที่ออกมาจากช่อง Nozzle มาควบคุมการทำงานของรีเลย์ ที่จะเป็นตัวควบคุมความดันลมที่ออกมา



รูปที่ 3.16 แสดงการวัดความดันแตกต่างโดยใช้ Flapper-nozzle

3.6.2 ระบบไฟฟ้า

ระบบการวัดความดันแตกต่างและส่งสัญญาณด้วยวิธีทางไฟฟ้านี้ใช้ร่วมกับแบบไฮดรอลิก หรือนิวแมติกเสมอ โดยที่ระบบการวัดและตรวจจัดการเปลี่ยนแปลงความดันจะใช้บูร์ดองเกจ ถ้าหากตัวบูร์ดอง เคลื่อนที่ก็จะทำให้แกนเหล็กของระบบแม่เหล็กไฟฟ้าเปลี่ยนตำแหน่งไปจากเดิม นั่นคือ แรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความดันที่เปลี่ยนไป ถึงแม้ว่าระบบการส่งสัญญาณความดันในรูปของสัญญาณไฟฟ้าจะมีข้อดีในด้านที่จะสามารถส่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สัญญาณไปได้ในระยะทางไกล ๆ ก็ตาม บางครั้งอุปกรณ์ที่ใช้ในการควบคุมจำเป็นต้องใช้ในรูปแบบที่ทำงานด้วยระบบนิวแมติกทั้งนี้เพราะว่า เพื่อป้องกันอันตรายที่อาจเกิดขึ้นได้ในอุตสาหกรรมบางประเภท ได้แก่ อุตสาหกรรมก๊าซธรรมชาติ อุตสาหกรรมปิโตรเลียม ฯลฯ ดังนั้นจึงต้องมีการเปลี่ยนแปลงสัญญาณทางไฟฟ้า และนิวแมติกให้เข้ากับระบบที่ต้องการใช้งานก่อนเสมอ

3.7 บทสรุป

ในส่วนของบทนี้ได้กล่าวถึงระบบของการวัดความดัน โดยให้ความละเอียดในด้านของชนิดของความดัน ซึ่งมีความดันเกจ ความดันสัมบูรณ์ และสุญญากาศ นอกจากนี้ได้กล่าวถึงรูปแบบของการวัดความดันโดยทั่วไปในทางอุตสาหกรรม ซึ่งแบ่งออกเป็น 2 กลุ่มใหญ่ ๆ คือ การวัดความดันที่ไม่แปรเปลี่ยนตามเวลา และการวัดความดันที่แปรเปลี่ยนตลอดเวลา ในอุตสาหกรรมโดยทั่วไป จะพิจารณาระบบการวัดความดันเป็นระบบการวัดความดันทางกล กับระบบการวัดความดันทางไฟฟ้า โดยเครื่องมือในระบบการวัดความดันทางกลนั้นแบ่งออกเป็น 3 ระบบด้วยกัน ได้แก่ ระบบแบบใช้ความสมดุลของของไหล แบบใช้ความสมดุลของแรง และแบบใช้หลักของความยืดหยุ่น ส่วนระบบการวัดความดันทางไฟฟ้านั้นจะใช้หลักของการเปลี่ยนแปลงคุณลักษณะบางประการของอุปกรณ์ไฟฟ้า ได้แก่ ความต้านทาน ความเหนี่ยวนำ และความจุไฟฟ้า ซึ่งบางกรณีการวัดความดันในกระบวนการอาจใช้ทั้งระบบทางกล และทางไฟฟ้าร่วมกัน เช่น การตรวจวัดความดันจะใช้หลักการทางกล จากนั้นจึงต่อร่วมกันทางไฟฟ้า โดยใช้การเปลี่ยนความดันนั้นให้เป็นสัญญาณทางไฟฟ้า เพื่อทำการชี้แสดงค่าหรือบันทึกค่าต่อไป โดยที่ทั้งสองระบบนี้สามารถที่จะนำมาประยุกต์ใช้ในการวัดในระบบของการวัดสุญญากาศ และระบบการวัดความดันแตกต่างได้

บทที่ 4

การประเมินและแสดงค่าความไม่แน่นอนของผลการวัด

4.1 บทนำ

แนวทางสำหรับการประเมิน และแสดงค่าความไม่แน่นอนของผลการวัด ในที่นี้จะยึดถือตาม ISO/TA G4: January 1993 "Guide to the expression of uncertainty in measurement" และ NIS 3003 Edition 8 May 1995 "Uncertainty and confidence in measurement" ของ NAMAS [19-20] ซึ่งเป็นข้อแนะนำการแสดงความไม่แน่นอนของการวัด เพื่อใช้เป็นมาตรฐานสำหรับการสอบเทียบ การรับรองห้องปฏิบัติการ และการบริการทางมาตรวิทยา

4.2 แนวคิดในการประเมินความไม่แน่นอน

การแสดงผลการวัดจะสมบูรณ์ไปไม่ได้ เว้นเสียแต่ว่าจะได้รวมเอาความไม่แน่นอนของการวัดมาประเมินไว้ด้วย ความไม่แน่นอนของผลการวัดคือ พารามิเตอร์ที่แสดงการกระจายค่าของการวัดอย่างสมเหตุสมผล เป็นสิ่งที่บ่งบอกถึงพิสัยของค่าการวัดว่า สิ่งที่ถูกวัดอยู่ภายในค่าที่ประเมินนี้ด้วยระดับความเชื่อมั่นที่บอกไว้ ดังนั้นจึงเป็นเรื่องจำเป็นที่ต้องแยกคำว่า "ความผิดพลาด" (Error) ออกจากคำว่า "ความไม่แน่นอน" (Uncertainty) ความผิดพลาดของการวัด หมายถึงผลของการวัดลบด้วยค่าจริงของสิ่งที่ถูกวัด และถ้าเป็นไปได้ต้องใส่ "ค่าแก้" (Correction) ซึ่งมีค่าเท่ากับค่าผิดพลาด แต่เครื่องหมายตรงกันข้าม เมื่อนำเอาค่าแก้มารวมกับผลการวัดที่ได้ ก็จะได้ค่าจริง แต่เนื่องจากค่าจริงคือค่าที่ไม่มีใครทราบแน่นอน ค่าแก้ก็จะเป็นค่าประมาณและความผิดพลาดก็ยังคงมีหลงเหลืออยู่ ซึ่งจะไปรวมอยู่ในค่าความไม่แน่นอนที่รายงานในผลการวัด

จากความหมายของคำว่า "ความผิดพลาด" ที่กล่าวแล้วนั้น สามารถให้ความหมายของความไม่แน่นอน ตามมาได้ว่า ความไม่แน่นอน คือพิสัย (Range) รอบๆ ค่าความผิดพลาด โดยคิดว่าความผิดพลาดอยู่ที่ค่าศูนย์ของความไม่แน่นอน ซึ่งอาจจะแสดงลักษณะการกระจายความเป็นไปได้ของความผิดพลาด การกระจายของความผิดพลาดนี้ อาจได้จากการสังเกตการกระจายของผลการวัด จากทฤษฎีกลไกของความผิดพลาด หรือวิธีอื่นๆ CIPM แนะนำว่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานคือ การแจกแจงของผลการวัด (1 σ) ในส่วนของการสอบเทียบนั้นยังถือว่าไม่เพียงพอ ยังจะต้องมีการระบุช่วงความเชื่อมั่น เพื่อให้สามารถบอกได้ว่าการกระจายอยู่ในพิสัย ที่อ้างด้วยระดับความเชื่อมั่นที่แน่นอน (เช่น 95%, 99%) โดยที่ในรูปแบบดั้งเดิม องค์ประกอบของความไม่แน่นอนจะเป็นแบบ "สุ่ม" (Random) หรือแบบ "ระบบ" (Systematic) ซึ่งเป็นข้อดีที่มีการเฉพาะเจาะจงไปในกระบวนการวัด ที่บ่งบอกภายใต้เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ได้เงื่อนไขที่กำหนดในรูปแบบการวัดแห่งชาติ ความไม่แน่นอนที่มาจากห้องปฏิบัติการสอบเทียบจะมีทั้ง "สุ่ม" และ "ระบบ" ตัวอย่างเช่น ห้องปฏิบัติการสอบเทียบ A ทำการสอบเทียบมาตรฐานอ้างอิงให้กับห้องปฏิบัติการสอบเทียบ B ที่มีระดับต่ำกว่า ก็จะรายงานค่าผลการวัดพร้อมความไม่แน่นอน 1 ค่า ซึ่งเป็นความไม่แน่นอนที่รวมเอาความไม่แน่นอนสุ่ม และความไม่แน่นอนระบบของห้องปฏิบัติการเข้าด้วยกัน เมื่อห้องปฏิบัติการ B นำมาตรฐานตัวนั้นมาใช้งาน ค่าความไม่แน่นอนรวมของการสอบเทียบจากห้องปฏิบัติการ A จะกลายเป็นความไม่แน่นอนระบบของห้องปฏิบัติการ B

เนื่องจากโดยธรรมชาติแล้ว ความไม่แน่นอนสามารถเปลี่ยนแปลงได้ CIPM (International Committee for Weights and Measures) จึงกำหนดให้มีการแบ่งจำพวกของความไม่แน่นอน เป็น 2 ประเภท ตามวิธีที่ใช้ในการประมาณค่าที่เป็นตัวเลขกล่าวคือ

A บั้จจัยความไม่แน่นอนที่สามารถประเมินได้โดยวิธีทางสถิติ

B บั้จจัยความไม่แน่นอนทั้งหลายที่สามารถประเมินได้โดยวิธีอื่นๆ

การแยกประเภทบั้จจัยความไม่แน่นอนว่าเป็นจำพวก A และ B หรืออย่างที่เคยให้อยู่ทุกๆ ไปว่าเป็นแบบ "สุ่ม" (Random) และ "ระบบ" (Systematic) นั้นไม่ใช่เป็นเรื่องง่ายๆ เสมอไป ธรรมชาติของบั้จจัยของความไม่แน่นอนนั้น พิจารณาได้จากการที่ปริมาณที่วัดได้ปรากฏออกมา ในรูปแบบทางคณิตศาสตร์ ที่ใช้อธิบายกระบวนการวัดนั้นๆ เมื่อปริมาณที่วัดได้ ถูกนำไปใช้ในทางที่ต่างกันไป บั้จจัย "สุ่ม" ก็อาจกลายเป็นบั้จจัย "ระบบ" หรือบั้จจัย "ระบบ" ก็อาจกลายเป็นบั้จจัย "สุ่ม" ได้เช่นกัน

CIPM ใช้วิธีในการแสดงค่าของบั้จจัยแต่อย่างที่มีผลต่อความไม่แน่นอนของการวัด โดยอาศัยส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานที่เรียกว่า "ความไม่แน่นอนมาตรฐาน" (Standard uncertainty)

4.3 รูปแบบของกระบวนการวัด

ปริมาณที่ถูกวัด Y เป็น output หรือปริมาณผลลัพธ์ซึ่งขึ้นอยู่กับปริมาณ input X_i ($i = 1, 2, 3 \dots n$) และอยู่ในรูปของ function f

$$Y = f(X_1, X_2, \dots, X_n) \quad (4.1)$$

ปริมาณอินพุท (input) อาจประกอบด้วย

- ค่าที่ได้จากกระบวนการวัด
- ค่าที่ได้จากใบรายงานผลสอบเทียบของตัวมาตรฐาน
- ปริมาณที่มีอิทธิพลต่อการวัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เนื่องจากค่าจริงของ X_i ไม่สามารถทราบได้อย่างแน่นอน จึงใช้ค่าประเมิน (Estimated value) x_i แทน X_i ดังนั้น output Y จึงต้องเป็น output estimate y

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_n) \quad (4.2)$$

การประเมินส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานที่มาจาก output estimated เรียกว่า combined standard uncertainty $U_c(y)$ ซึ่งได้จากค่าประมาณของส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของ estimated value x_i ซึ่งเรียกว่า standard uncertainty $U(x_i)$

ที่มาของ $U(x_i)$

- การแจกแจงความน่าจะเป็น (Probability distribution) หรือการแจกแจงความถี่ (Frequency distribution) ของ input x_i ซึ่งถือเป็น type A
- การแจกแจงในครั้งก่อน (Priori distribution) ถือเป็น type B

4.4 ขั้นตอนการประเมินความไม่แน่นอน

1. หาค่า $u(x_i)$ ซึ่งมาจากทั้ง type A และ type B
2. นำเอาปริมาณ $u(x_i)$ มารวมกันเป็นผลรวมความไม่แน่นอนของผลลัพธ์ y ที่เรียกว่า combined uncertainty
3. เมื่อต้องการรายงานผลที่ 95% หรือ 99% ก็คำนวณเป็นค่า Expanded uncertainty
4. รายงานผล เป็น $Y = y \pm U$

4.4.1 การประเมินค่าความไม่แน่นอนมาตรฐาน Type A (Type A evaluation of standard uncertainty)

การประเมินความไม่แน่นอนมาตรฐาน Type A จะใช้วิธีทางสถิติในการประเมิน เมื่อมีปริมาณอินพุต x_k ที่ได้จากการสังเกต n ครั้ง ภายใต้การวัดที่สภาวะเดียวกัน ค่าเฉลี่ยจากการวัดจะเป็น

$$\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n X_k \quad (4.3)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ \bar{X} = ค่าเฉลี่ยจากการวัด n ครั้ง
 X_k = ค่าของผลการวัดครั้งที่ k

ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard deviation) ของกลุ่มตัวอย่าง

$$s = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{k=1}^n (X_k - \bar{X})^2} \quad (4.4)$$

ในแต่ละกลุ่มตัวอย่าง ค่าของ \bar{X}, s ก็จะแตกต่างกันไป สำหรับการวัดที่มีจำนวน n ครั้ง ที่มีค่า มากๆ ค่าเฉลี่ยของการวัดเหล่านั้น จะเข้าใกล้ค่ากลางของการกระจายของผลการวัดทั้งหมด ซึ่งการ แจกแจงจะอยู่ในรูปโค้งปกติ ในทางปฏิบัติกระบวนการวัดจะเป็นตัวจำกัดการเบี่ยงเบนไปจากค่ากลาง จากผลการวัดของกลุ่มตัวอย่างเพียงกลุ่มเดียว ถ้าประมาณเป็นส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของประชากร ทั้งหมด จะประมาณได้ว่า

$$s(X_k) = \sqrt{\frac{1}{(n-1)} \sum_{k=1}^n (X_k - \bar{X})^2} \quad (4.5)$$

เป็นที่น่าสังเกตว่าการประมาณแบบนี้ มีความแตกต่างจากส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของกลุ่มตัวอย่าง ตรงที่ แทน factor $\frac{1}{n}$ ด้วย factor $\frac{1}{n-1}$ ในเครื่องหมาย square root เท่านั้น และความแตกต่างนี้ จะมีค่าน้อยลงเมื่อจำนวนครั้งของการวัดมีค่ามากขึ้น

ดังนั้นส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานโดยประมาณของค่าเฉลี่ยของสิ่งที่ถูกวัดจะเป็น

$$s(\bar{X}) = \frac{s(X_k)}{\sqrt{n}} \quad (4.6)$$

การประเมินทางสถิติที่กล่าวมาในเบื้องต้นนี้ ถือว่าเป็นการประมาณ Type A ซึ่งรูปแบบของการ ประมาณค่าความไม่แน่นอน Type A จะเป็น

$$u(X_i) = s(\bar{X}) \quad (4.7)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในทางปฏิบัติของการสอบเทียบ ไม่จำเป็นเสมอไปที่จะต้องทำการวัดหลายๆ ครั้ง เช่น กรณีที่มีความน่าเชื่อถือในผลการประมาณส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของการวัดจากการประเมิน Type A ในการวัดครั้งก่อนซึ่งในการวัดครั้งนั้นกระทำที่จำนวนครั้งมากๆ ก็สามารถใช้ค่า $S(X_k)$ มาจากครั้งก่อนได้ ดังนั้นการคำนวณส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานโดยประมาณในสมการ (4.6) ก็จะใช้ค่า $S(X_k)$ ในครั้งก่อนและหารด้วย square root n ซึ่ง n แทนจำนวนครั้งในการวัดครั้งใหม่ โดยไม่ต้องนำเอาสมการ ที่ (4.5) มาคำนวณแต่อย่างใด ถ้าเป็นไปได้ควรกำหนดให้มีการวัดอย่างน้อย 2 ครั้ง แต่ในบางครั้ง การวัดเพียงอย่างเดียวก็สามารถยอมรับได้ นั้นหมายถึงว่าเครื่องมือที่ใช้ทำการวัดต้องได้รับการสอบเทียบ และเครื่องมือที่มีอิทธิพลต่อการวัดน้อยมากจนสามารถตัดความไม่แน่นอนของเครื่องมือวัดทิ้งไปได้ ในขณะที่เดียวกันในการสอบเทียบ บางครั้งมีความจำเป็นที่จะต้องทำการวัดครั้งเดียว ด้วยเครื่องมือที่ได้รับการสอบเทียบทั้งๆ ที่ทราบอยู่แล้วว่า มีความซ้ำกันได้ (Repeatability) ที่ไม่สมบูรณ์ และจะต้องขึ้นอยู่กับการประเมินความสามารถซ้ำกันได้ของเครื่องมือแบบเดียวกัน ความเชื่อถือได้ของการประเมินครั้งก่อนขึ้นอยู่กับจำนวนของเครื่องมือแบบเดียวกันที่ใช้เป็นตัวอย่าง เครื่องมือเหล่านั้นเป็นตัวแทนของเครื่องมือทั้งหมดได้ดีเพียงใด เพื่อหลีกเลี่ยงการประเมินที่ต่ำกว่าของ Random calibration เป็นที่ยอมรับกันว่า การนำเอาค่าที่มากที่สุดของส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน $S(X_k)$ มาใช้จะดีกว่าค่าเฉลี่ย และยังเป็นที่ยอมรับว่า ข้อมูลที่ได้จากการประเมินครั้งก่อนควรมีการนำมาทบทวนอยู่เป็นประจำ หรือถ้ามีความจำเป็นควรมีการปรับปรุงให้ทันสมัยอยู่เสมอ และแน่นอนเมื่อทำการวัดครั้งเดียวค่าของ n ในสมการที่ (4.6) ต้องแทนด้วย 1

4.4.2 การประเมินค่าความไม่แน่นอนมาตรฐาน Type B (Type B evaluation of standard uncertainty)

การประเมินค่าความไม่แน่นอนมาตรฐาน Type B โดยทั่วๆ ไปมักจะเป็นความไม่แน่นอนที่ทราบในลักษณะของ

- การแจกแจงในครั้งก่อน
- ประสบการณ์ หรือความรู้ในพฤติกรรมและคุณสมบัติของวัสดุ หรือเครื่องมือที่ใช้
- ข้อกำหนดจำเพาะของผู้ผลิต
- ข้อมูลในใบรับรองการสอบเทียบ
- ข้อมูลจากเอกสารอ้างอิง หรือ หนังสือคู่มือ (Handbook)

ความสำเร็จในการประเมินขึ้นอยู่กับความรู้ในกระบวนการวัด และประสบการณ์ของผู้ทำการวัดเอง

4.4.2.1 กรณีที่กำหนดเป็นจำนวนเท่าของส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (A multiple of a standard deviation)

จะได้ค่าความไม่แน่นอนมาตรฐานดังนี้

$$u(X_i) = \frac{\text{quoted value}}{\text{multiplier}} \quad 4.8$$

4.4.2.2 กรณีที่ความไม่แน่นอนถูกกำหนดในรูปของระดับความเชื่อมั่น

ในกรณีที่ความไม่แน่นอนถูกกำหนดในรูปของระดับความเชื่อมั่น เช่น ที่ 90%, 95% หรือ 99% ค่าความไม่แน่นอนมาตรฐานจะเท่ากับค่าความไม่แน่นอนที่อ้าง หาดด้วยค่าประกอบ (Factor) ที่ระดับความเชื่อมั่นที่อ้างนั้น ซึ่งค่าตัวประกอบดังกล่าว ได้แก่ 1.64, 1.96, 2.58 ที่ 90%, 95% หรือ 99% ตามลำดับ

4.4.2.3 กรณีที่ทราบขอบเขตการกระจายที่แน่นอน (100%)

ในกรณีที่ทราบขอบเขตการกระจายที่แน่นอน ตัวอย่างเช่น ข้อกำหนดจำเพาะของผู้ผลิต ค่าคงที่จากหนังสือคู่มือ เป็นต้น ในการประเมินค่า Type B ในลักษณะนี้ เมื่อค่าประเมินจากสมมติฐาน ที่ว่า ความไม่แน่นอนนี้มีการกระจายความน่าจะเป็นแบบสี่เหลี่ยมผืนผ้า (Rectangular distribution or 100% distribution) ซึ่งมีขีดจำกัดล่าง (Lower limit) เป็น a_- และขีดจำกัดบน (Upper limit) เป็น a_+ ในกรณีเช่นนี้ ค่าประมาณอินพุตจะเป็น

$$X_i = (a_+ - a_-)/2 \quad (4.9)$$

และความไม่แน่นอนมาตรฐาน $u(X_i)$

$$u(X_i) = \frac{a}{\sqrt{3}} \quad (4.10)$$

เมื่อ $a = (a_+ - a_-)/2$

4.4.3 ความไม่แน่นอนมาตรฐานรวม (Combined standard uncertainty)

ความไม่แน่นอนมาตรฐานรวมของการวัด สัญลักษณ์ u_c ใช้แสดงความเบี่ยงเบนมาตรฐานโดยประมาณผลการวัด ค่านี้ได้จากการรวมความไม่แน่นอนมาตรฐาน u_i แต่ละตัว ไม่ว่าจะเกิดจากการประเมิน Type A หรือ การประเมิน Type B โดยวิธีการรวมส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานที่เรียกว่า กฎแห่งการกระจายความไม่แน่นอน (Law of propagation of uncertainty) และวิธีรากที่สองของผลบวกของยกกำลังสอง (Root sum of square : RSS) โดยวิธี Low of propagation of uncertainty

$$u_c^2(y) = \sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \right)^2 u^2(x_i) + 2 \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \frac{\partial f}{\partial x_i} \frac{\partial f}{\partial x_j} u(x_i, x_j) \quad (4.11)$$

จากสมการที่ (4.11) ปริมาณ Input มีลักษณะเป็น Correlated input quantities ถ้าปริมาณ Input มีลักษณะเป็น Uncorrelated input quantities นั่นคือ Input ทั้งหมดเป็นอิสระต่อกัน สมการที่ 4.11 จะเหลือเพียง

$$u_c^2(y) = \sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \right)^2 u^2(x_i) \quad (4.12)$$

ถ้า $\left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \right) = 1$ แล้ว สมการที่ (4.12) จะเป็น

$$u_c^2(y) = \sum_{i=1}^n u^2(x_i) \quad (4.13)$$

ซึ่งสมการที่ (4.13) ก็คือ Root sum of square method

ความไม่แน่นอนมาตรฐานรวม ได้ถูกนำมาใช้อย่างกว้างขวางในการแสดงความไม่แน่นอนของการวัด โดยเฉพาะอย่างยิ่งในปีคริสต์ศักราช 1986 CIPM ได้แนะนำให้ผู้เกี่ยวข้องทั้งหมดใช้ความไม่แน่นอนมาตรฐานรวม u_c จึงถูกนำมาใช้ในการรายงานผลของการกำหนดค่าคงที่พื้นฐาน การวิจัยด้านมาตรวิทยาพื้นฐาน และการเปรียบเทียบระหว่างประเทศเพื่อให้เห็นจริงตามหน่วยมาตรฐานสากล (SI Unit)

การวัดในทางปฏิบัติส่วนใหญ่ ค่าที่วัดได้ y และความไม่แน่นอนมาตรฐานรวม $u_c(y)$ จะอยู่ในลักษณะของระฆังคว่ำ (Gaussian) ในกรณีเช่นนี้ถ้า $u_c(y)$ มีความไม่แน่นอนน้อยจนไม่ต้องนำมาคิดแล้ว $u_c(y)$ จะเป็นตัวกำหนดช่วง $y - u_c(y)$ ถึง $y + u_c(y)$ รอบๆ ผลการวัด y อันได้จากตัวที่ถูกวัด Y ด้วยระดับความเชื่อมั่น 68% ดังนั้นจึงอาจกล่าวด้วยระดับความเชื่อมั่นประมาณ 68% ได้ว่า

$$y - u_c(y) \leq Y \leq y + u_c(y)$$

โดยทั่วไปจะเขียนในรูป

$$Y = y \pm u_c(y) \quad (4.14)$$

4.4.4 ความไม่แน่นอนขยาย (Expanded uncertainty)

ถึงแม้ว่าความไม่แน่นอนมาตรฐานรวม u_c จะถูกไปใช้เพื่อแสดงความไม่แน่นอนของผลการวัดอย่างกว้างขวางแล้วก็ตาม แต่มีอยู่บ่อยๆ ที่อุตสาหกรรม การค้า และราชการ มีความต้องการ ช่วงความเชื่อมั่นที่แตกต่างไปจาก ความไม่แน่นอนมาตรฐาน u_c นี้เรียกว่า ความไม่แน่นอนขยาย (Expanded uncertainty) ซึ่งมีสัญลักษณ์ U และก็ได้มาโดยการคูณค่า $u_c(y)$ ด้วย coverage factor ซึ่งมีสัญลักษณ์ k ดังนั้น

$$U = k u_c(y) \quad (4.15)$$

และสามารถกล่าวอย่างมั่นใจได้ว่า

$$y - U \leq Y \leq y + U \quad (4.16)$$

ซึ่งปกติจะเขียนว่า

$$Y = y + U \quad (4.17)$$

โดยทั่วไปค่าของ coverage factor k ได้ถูกเลือกโดยอาศัยพื้นฐานของความต้องการ ความเชื่อมั่นตามช่วงที่ต้องการโดย $U = k u_c$ โดยปกติค่า k จะมีระยะอยู่ระหว่าง 2 ถึง 3 เมื่อ u_c ถือว่าเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มีความไม่แน่นอนน้อยจนไม่นำมาคิดแล้ว $U = 2u_c$ (เมื่อ $k=2$) เป็นช่วงความเชื่อมั่นที่มีระดับความเชื่อมั่นประมาณ 95 % และ $U = 3u_c$ (เมื่อ $k=3$) ความเชื่อมั่นที่มีระดับความเชื่อมั่นมากกว่า 99% เป็นต้น

หมายเหตุ สำหรับปริมาณ Z ที่มีการกระจายแบบธรรมดามีค่ากลาง μ_z และความเบี่ยงเบนมาตรฐาน σ ช่วงความเชื่อมั่น $\mu_z \pm k\sigma$ แล้วได้ค่า 68.27, 90, 95.45, 99 และ 99.73 เปอร์เซนต์ ของการกระจายแล้วค่า k ก็จะเป็น $k=1$, $k=1.645$, $k=2$, $k=2.576$ และ $k=3$ ตามลำดับ

4.5 การรายงานความไม่แน่นอน (Reporting Uncertainty)

เมื่อรายงานผลการวัดและความไม่แน่นอน จะต้องประกอบด้วยข้อมูลต่อไปนี้ในใบรายงานผลหรืออ้างอิงถึงเอกสารอ้างอิงที่เกี่ยวข้องคือ

- ปัจจัยความไม่แน่นอนมาตรฐานทุกอย่างรวมทั้งองค์ความเป็นอิสระที่เหมาะสม และค่าของ u_c ทุกๆ ปัจจัยควรจะได้รับบ่งชี้ตามวิธีการที่ใช้ในการประมาณค่า
- Type A ปัจจัยที่ประเมินโดยวิธีทางสถิติ
- Type B ปัจจัยที่ประเมินโดยวิธีอื่นๆ
- รายละเอียดที่แสดงว่าความไม่แน่นอนมาตรฐานประเมินมาได้อย่างไร
- อธิบายว่า การเลือก k กระทำอย่างไรในกรณีที่ k ไม่เท่ากับ 2 มีอยู่บ่อยๆ ที่ความไม่แน่นอนถูกแปลออกมาในรูปของระดับความเชื่อมั่น สำหรับช่วงความเชื่อมั่นที่กำหนด โดย U หรือ u_c ในกรณีเช่นนี้ ควรบอกที่มาของค่าคงที่ได้ด้วย t

4.6 สรุป

การแสดงผลของการวัดจะสมบูรณ์ก็ต่อเมื่อได้รวมเอาความไม่แน่นอนของการวัดมาประเมินไว้ด้วย แนวทางสำหรับการประเมินและแสดงค่าความไม่แน่นอนของผลการวัดนี้ ยึดถือตาม ISO/TAG4 : January 1993 Guide to the expression of uncertainty in measurement และ NIS3003 Edition 8 May 1995 "Uncertainty and confidence in measurement" ของ NAMAS

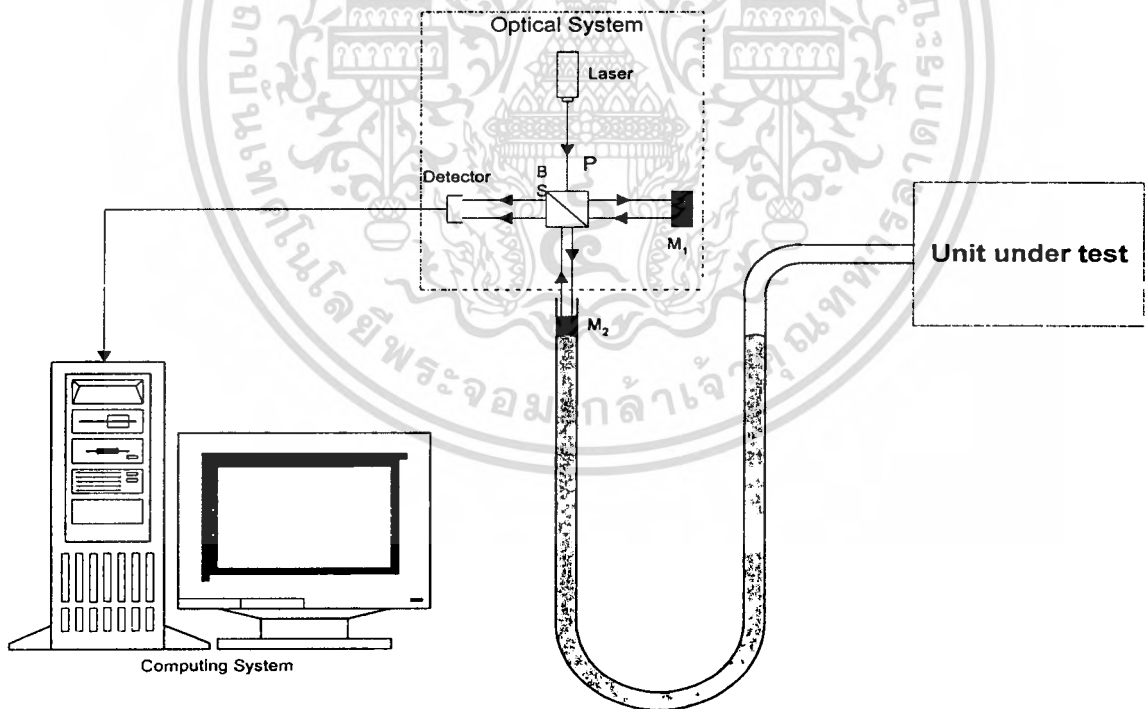
บทที่ 5

ขั้นตอนในการดำเนินงานวิจัย

ในบทนี้จะกล่าวถึงขั้นตอนในการดำเนินงานวิจัย ซึ่งประกอบไปด้วย การออกแบบเครื่องวัดความดันมาตรฐานชั้นปฐม อุปกรณ์ที่ใช้ในระบบ การทำงานของระบบ การทดลองและผลสรุป ซึ่งอธิบายเป็นขั้นตอนดังต่อไปนี้

5.1 การออกแบบเครื่องวัดความดัน

ในการดำเนินการวิจัยและศึกษาเพื่อสร้างเครื่องมือวัดความดันมาตรฐานชั้นปฐมนี้ ใช้หลักการ Interferometric mercury โดยเลียนแบบหลักการจากเครื่อง Primary pressure standard ของบริษัท BAT (Bavaria avionik technologie GmbH) ประเทศสหพันธ์รัฐเยอรมัน ซึ่งในประเทศไทยมีใช้ที่ฝ่ายทดสอบทางมาตรวิทยา บริษัทการบินไทยจำกัด เพียงแห่งเดียว



รูปที่ 5.1 แสดงองค์ประกอบรวมของชุดเครื่องวัดความดันมาตรฐานที่สร้างขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่หลักการหลักนั้น ค่าความดันวัดได้จากความสัมพันธ์ของความหนาแน่นของปรอท ค่าแรงโน้มถ่วงของโลก และผลต่างของระดับความสูงของลำปรอท ซึ่งในการหาค่าความหนาแน่นของปรอทใช้หลักการของการตรวจสอบและสอบเทียบด้วยวิธีการเปรียบเทียบมวลของปรอทกับน้ำบริสุทธิ์ที่ 20°C ในปริมาตรที่เท่ากัน และขวดที่บรรจุได้รับการสอบเทียบในด้านของปริมาตร ความถูกต้องของเครื่องชั่งที่ใช้ได้รับการสอบเทียบจากมวลมาตรฐาน โดยสถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติ (ประเทศไทย : NIMT) ซึ่งสอบย้อนกลับไปยังสถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติประเทศเยอรมัน (PTB) ไปยังมวลมาตรฐาน 1 กิโลกรัมที่ BIPM ประเทศฝรั่งเศส สำหรับค่าแรงโน้มถ่วงของโลกนั้นใช้ค่าที่ได้จากการวัดของกรมแผนที่ทหารกองบัญชาการทหารสูงสุด กระทรวงกลาโหม เมื่อวันที่ 16 ธันวาคม 2541 ดังภาคผนวก ญ. ส่วนผลต่างของระดับความสูงของลำปรอทนั้นใช้วิธีการวัดด้วยระบบเชิงแสง โดยวิธี Michelson interferometric

องค์ประกอบหลักของระบบรวมที่สร้างขึ้นแสดงดังรูปที่ 5.1 จึงประกอบไปด้วย 3 ส่วนหลัก ได้แก่

- ส่วนที่ 1 โครงสร้างหลักเพื่อบรรจุปรอท ใช้หลอดแก้วรูปตัวยู (U Tube)
- ส่วนที่ 2 ส่วนของระบบทางแสง (Optical system)
- ส่วนที่ 3 ส่วนของการประมวลผลข้อมูลทางคอมพิวเตอร์ (Computing system)

5.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในระบบ

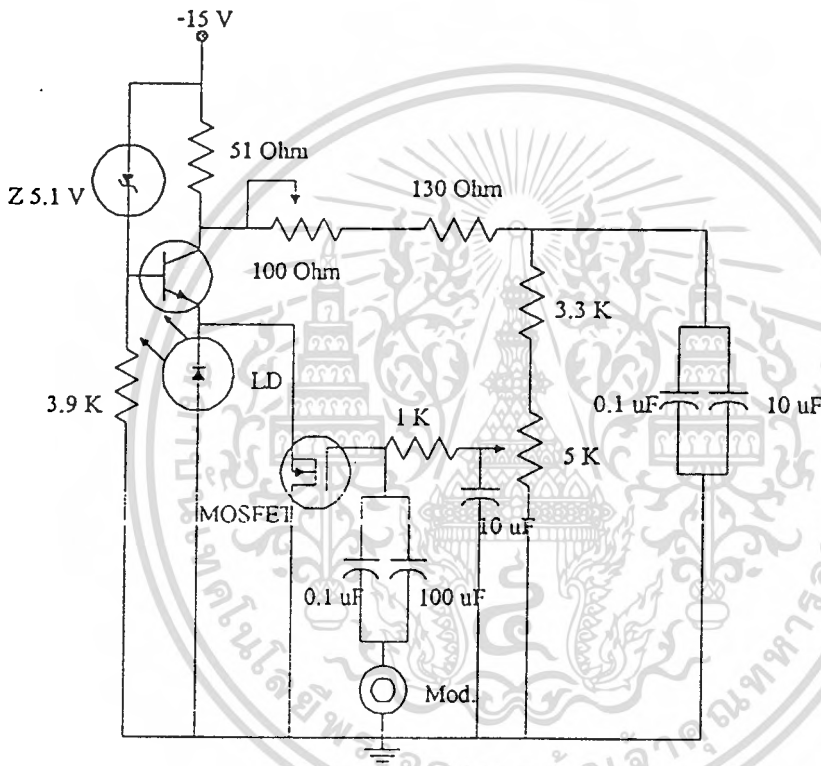
5.2.1 ส่วนที่ 1 โครงสร้างหลักเพื่อบรรจุปรอท ใช้หลอดแก้วรูปตัวยู (U-Tube) ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 1 เซนติเมตร ความสูง 2 เมตร ยึดติดแน่นกับฐานไม้

5.2.2 ส่วนที่ 2 ระบบทางแสง ในส่วนนี้เพื่อต้องการหาค่าผลต่างอย่างละเอียดของระดับความสูงของลำปรอท ประกอบด้วย

5.2.2.1 แหล่งกำเนิดแสงชนิดเลเซอร์กึ่งตัวนำ ใช้เลเซอร์ไดโอด เลือกชนิดความยาวคลื่น (Wavelength) 633 นาโนเมตร การจัดหาแหล่งกำเนิดแสงไดโอดเลเซอร์เพื่อใช้ในการทำวิจัยนี้สิ่งที่ต้องคำนึงถึงคือ กำลังของแสงจะต้องมีกำลังที่เหมาะสมเพื่อที่จะสามารถส่งไปได้เป็นระยะทางไกล ช่วงความยาวคลื่นแสงของแหล่งกำเนิดแสงจะต้องห่างกันพอสมควรเพื่อทำการแยกความยาวคลื่นได้ ซึ่งจะทำให้เกิดการรบกวนข้ามช่องสัญญาณทางแสงน้อย อายุการใช้งานของแหล่งกำเนิดแสงจะต้องมีอายุการใช้งานนาน และช่วงอุณหภูมิที่ใช้งานจะต้องมีช่วงที่กว้างเพื่อที่จะสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับงานในภาคสนามได้ เลเซอร์ไดโอดที่นำมาใช้นี้เป็นผลิตภัณฑ์ของบริษัท SHARP เบอร์ LT022MCO ซึ่งมีข้อกำหนดทางเทคนิคดังภาคผนวก ข.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.2.2.2 ส่วนของวงจรขับไดโอดเลเซอร์ ทั้งนี้วงจรขับที่ทำให้เลเซอร์ไดโอดทำงานได้นั้นจะต้องมีเสถียรภาพในการรักษากระแสให้คงที่เป็นอย่างมาก เนื่องจากคุณสมบัติของเลเซอร์ไดโอดนั้นเมื่อกระแสเปลี่ยนไป ทำให้ความยาวคลื่นที่ให้ออกมานั้นเปลี่ยนไปด้วย ตลอดจนความเหมาะสมกับการใช้งาน ได้มีการพัฒนารูปแบบของ วงจร โดยแสดงผังวงจรของชุดขับไดโอดเลเซอร์ซึ่งใช้กับงานวิจัยนี้ ดังรูปที่ 5.2



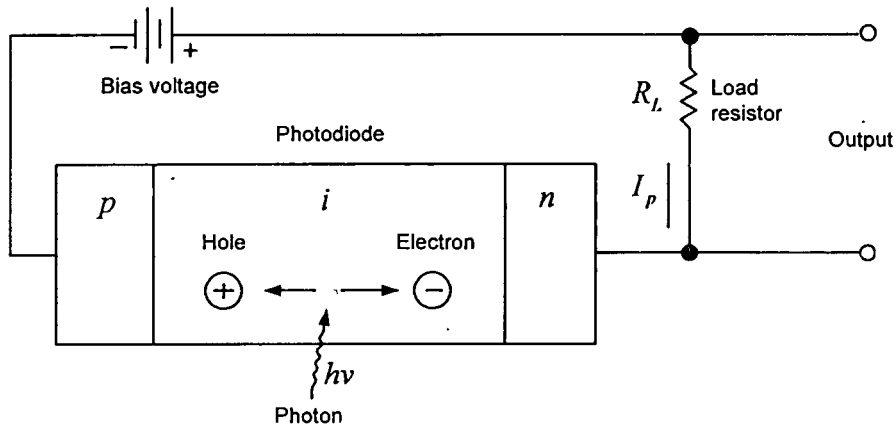
รูปที่ 5.2 แสดงวงจรขับไดโอดเลเซอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

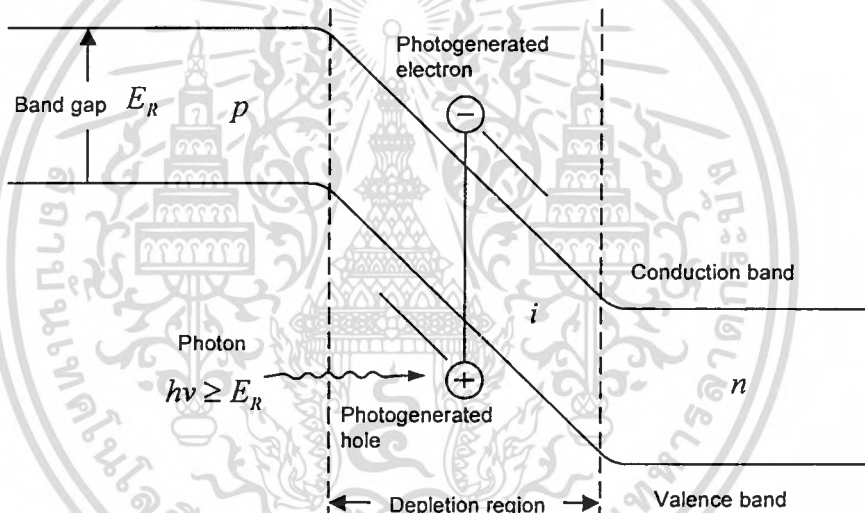
5.2.2.3 **ผลึกรวมและแยกแสง (Beamsplitter:BS)** เพื่อให้แสงแยกเป็น 2 ลำ โดยในลำแสงแรกนั้นไปแนวตั้งจากกับแนวเดิมไปยังกระจกแล้วสะท้อนกลับ อีกแนวหนึ่งผ่านไปยังกระจกที่ผิวของลำ โปรทและสะท้อนกลับ แนวลำแสงที่สะท้อนกลับของทั้งสองลำเกิดการแทรกสอด

5.2.2.4 **อุปกรณ์รับแสง (Photodetector)** ใช้โฟโตไดโอดเป็นรุ่น BPW21 เป็นตัวรับแสง รูปแบบโครงสร้างของพินโฟโตไดโอด (PIN-Photodiode) แสดงในรูปที่ 5.3 ซึ่งประกอบไปด้วยส่วนที่เป็น P และ N ของสารกึ่งตัวนำ นอกจากนี้ยังมีบริเวณที่เป็นอินทรินซิก (Intrinsic) คั่นอยู่ระหว่างสาร P และ N โดยจะมีการเจือสาร N เข้าไปในเนื้อแท้ของสารนี้ด้วย ในการทำงานปกติจะต้องไบอัสกลับให้กับพินโฟโตไดโอด เมื่อมีโฟตอนมาตกกระทบ โดยมีพลังงานเท่ากับหรือมากกว่าพลังงานของช่องว่าง (Band Gap) ของสารกึ่งตัวนำ โฟตอนจะปลดปล่อยพลังงานทำให้อิเล็กตรอนจากระดับพลังงานต่ำเคลื่อนที่ไปสู่ระดับพลังงานสูง การทำงานของโฟตอนที่เพิ่มประจุให้กับตัวกลางแสดงในรูปที่ 5.4 อุปกรณ์ตรวจรับแสงปกติจะออกแบบให้ตัวกลางการทำงานหลักอยู่ที่บริเวณรอยต่อ (บริเวณรอยต่อคือบริเวณอินทรินซิก) ซึ่งเป็นบริเวณที่แสงตกกระทบและใช้ในการดูดกลืนพลังงานของโฟตอน เมื่อป้อนกระแสให้กับโฟโตไดโอด อิเล็กตรอนจะไหลทำให้อิเล็กตรอนเคลื่อนที่ผ่านตัวกลาง เมื่ออิเล็กตรอนและโฮล (Hole) มีการเคลื่อนที่เข้าไปในตัวกลางซึ่งมีระยะทางเป็น L_n หรือ L_p ของอิเล็กตรอนและโฮล ซึ่งเป็นฟังก์ชันของเวลาที่อิเล็กตรอนหรือโฮลกลับมารวมกันใหม่ เรียกว่า ช่วงชีวิตของพาหะ (Carrier Lifetime) τ_n และ τ_p

กำลังแสงที่ถูกดูดกลืนในสารกึ่งตัวนำนี้เป็นฟังก์ชันเอกซโปเนนเชียลของสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง และระยะทาง โดยที่สัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงดังกล่าว เป็นฟังก์ชันของความยาวคลื่น λ ส่วนสัมประสิทธิ์ของการดูดกลืนในช่วงความยาวคลื่นแสงของสารที่ใช้ทำโฟโตไดโอด มีค่าแตกต่างกันตามความยาวคลื่นคัทออฟ (λ_c) ซึ่งถูกกำหนดโดยพลังงานช่องว่าง (E_g) ของวัสดุ เช่นความยาวคลื่นคัทออฟ สำหรับซิลิกอน (Si) จะมีค่า 1.06 ไมโครเมตร และสำหรับเจอร์มาเนียม (Ge) จะมีค่าประมาณ 1.6 ไมโครเมตร



รูปที่ 5.3 แสดงการไบอัสให้พินโฟโตไดโอด



รูปที่ 5.4 แสดงการไหลของอิเล็กตรอนในรอยต่อของพินโฟโตไดโอด

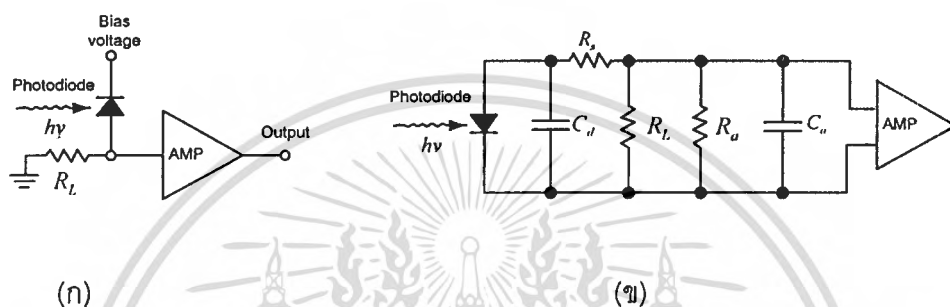
โดยที่ Photogenerated Electron และ Photogenerated Hole คืออิเล็กตรอนและโฮลที่เกิดจากการได้รับพลังงานแสง ส่วน Depletion Region คือ บริเวณที่แถบพลังงานนำไฟฟ้า (Conduction Band) แถบพลังงานวาเลนซ์ (Valence Band) ถูกทำให้อยู่ชิดกันมากขึ้นโดย Photogenerated Electron และ Photogenerated Hole

ถ้าที่บริเวณแพร่ของอิเล็กตรอนมีความกว้าง w เมื่อมีแสงตกบนผิวหน้าของโฟโตไดโอดพบว่า มีกระแสไฟฟ้า I_p จะเป็นฟังก์ชันของความกว้าง w, P_0, q และ $h\nu$ โดยที่ P_0 กำลังของแสงที่ตกกระทบบนโฟโตดีเทคเตอร์ q คือประจุอิเล็กตรอน และ $h\nu$ เป็นพลังงานโฟตอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ส่วนคุณสมบัติของโฟโตไดโอดมักถูกกำหนดในรูปของสัมประสิทธิ์ในการทำงานของโฟโตไดโอด ซึ่งแสดงในรูปของการตอบสนองต่อแสง (\mathcal{R}) โดยเป็นความสัมพันธ์ของสัมประสิทธิ์ทางคว้นตัม η (Quantum Efficiency) ดังนี้

$$\mathcal{R} = \frac{I_p}{P_0} = \frac{\eta q}{h\nu} \quad (5-1)$$



รูปที่ 5.5 แสดงรูปแบบของการใช้งานของพินโฟโตไดโอด

โดยทั่วไปกระแสรวมในพินโฟโตไดโอดจะตรวจรับได้จากระดับการตรวจรับแสงต่ำสุด ความไวของอุปกรณ์รับแสงในระบบการสื่อสารทางแสงจะแสดงในเทอมของแสงและกำลังของแสงที่ตรวจรับได้ต่ำสุด ส่วนการใช้งานมักต่อวงจรดังรูปที่ 3 ซึ่งจะต้องต่อตัวต้านทานโหลด R_L เข้ากับวงจรดังรูปที่ 5.5(ก) ส่วนรูปที่ 5.5(ข) จะเป็นวงจรภายในเปรียบเทียบของวงจรในรูปที่ 5.5(ก)

ข้อดีของโฟโตไดโอดชนิดนี้คือ สามารถตอบสนองต่อแสงเลเซอร์ไดโอดนี้ได้ดี เหมาะกับการวัดกำลังแสงน้อยๆ และมีพื้นที่รับแสงมากจึงช่วยลดปัญหาเรื่องการป้อนแสงได้ดี โฟโตไดโอดนี้ต่อเข้ากับภาคขยายสัญญาณอิเล็กทรอนิกส์ ที่ประกอบด้วยวงจรขยาย 2 ส่วน และมีวงจรกรองสัญญาณรบกวนประกอบอยู่ในส่วนนี้ด้วย เนื่องจากการใช้งานจะต้องมีการปรับเทียบอัตราส่วนการขยายสัญญาณของภาครับทั้งสอง ดังนั้นจึงจัดให้สามารถปรับเกณฑ์การขยายได้ที่ภาคหลังของวงจรขยายสัญญาณ ส่วนสัญญาณเอาต์พุตของภาคนี้จะนำไปต่อเข้ากับชุดการประมวลผลข้อมูลทางคอมพิวเตอร์ ในส่วนที่ 3 ต่อไป

5.2.3 ส่วนที่ 3 การประมวลผลข้อมูลทางคอมพิวเตอร์ ใช้อินเตอร์เฟสการ์ด ชนิด ET-DIO CARD แสดงดังรูปที่ 5.6 เป็นลักษณะ PC CARD ใช้เชื่อมต่อกับเครื่อง PC เพื่อขยายระบบอินพุตและเอาต์พุตและให้สัญญาณเอาต์พุตออกมาได้ทั้งในรูปของอนาล็อกและดิจิทัล ใช้โปรแกรมที่เขียนขึ้นในภาษาปาสคาล ดังภาคผนวก ฉ. เพื่อตรวจนับรั้วรอยของการแทรกสอด (Fringe) แล้วนำมาวิเคราะห์ประมวลผล ทำให้ทราบในเทอมของระยะทางออกมา



รูปที่ 5.6 แสดง อินเตอร์เฟสการ์ด (ET-DIO CARD)

5.3 การทำงานของระบบ

ความดันเกจ เป็นปริมาณที่ต้องกำจัดจากความสัมพันธ์ของความหนาแน่นของปรอท (ρ) ค่าแรงโน้มถ่วงของโลก (g) และผลต่างของระดับความสูงของลำปรอทในทั้งสองข้าง (h) จากความสัมพันธ์

$$P = \rho \cdot g \cdot h \quad (5.2)$$

ในระบบที่ออกแบบนี้ทั้งสามปริมาณจะได้รับการสอบเทียบเพื่อยืนยันค่าที่ถูกต้อง โดยที่ค่าความหนาแน่นของปรอทและค่าแรงโน้มถ่วงของโลก เป็นค่าที่หาออกมาเป็นค่าคงที่แล้ว พิจารณาในระบบสำหรับค่า ผลต่างของระดับความสูงของลำปรอทนี้ หาได้ ด้วยวิธี ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

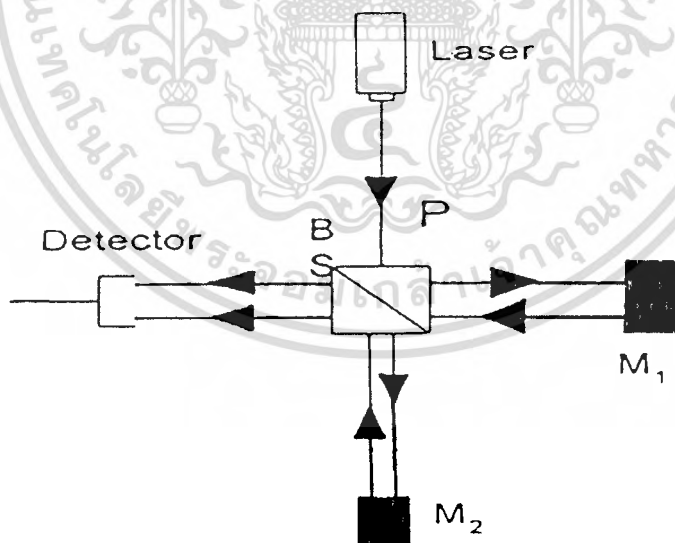
5.4 วิธีของไมเคิลสัน อินเทอร์เฟอโรมิเตอร์ (Michelson interferometer)

วิธีการนี้เป็นวิธีที่ได้จากคุณสมบัติของแสงในการเกิดการแทรกสอด (Interference) ของคลื่นแสง 2 คลื่นแสง โดยในการเกิดการแทรกสอดนี้ ที่จากรับจะเห็นเป็นริ้วรอยวงของการแทรกสอด (Fringe) สว่างและมีมืดสลับกันได้ ปรากฏการณ์นี้พบโดยนักฟิสิกส์ T.Young ในปี คริสต์ศักราช 1801 และในการทดลองของนักฟิสิกส์ Michelson and Morray โดยใช้ Michelson interferometer ในปี คริสต์ศักราช 1980

แสดงการจัดอุปกรณ์ดังรูปที่ 5.7 ลำแสงจากแหล่งกำเนิดเลเซอร์ไดโอด เป็นลำแสงที่มีสมบัติอาพันธ์ (Coherence) พุ่งเข้าสู่อุปกรณ์ผลึกรวมและแยกแสง (BS) และถูกแบ่งออกเป็น 2 ส่วน พุ่งตรงไปยังกระจกสะท้อนแสง M_1 และ M_2 ซึ่งตั้งฉากกับการเคลื่อนที่ของแสง และอยู่ห่างจากกระจกแบ่งเป็นระยะทาง l_1 และ l_2 ตามลำดับ จากนั้นคลื่นแสงทั้งสองที่มีระยะทางการเคลื่อนที่ทางแสง (Optical path length) ต่างกันเป็น

$$S = S_1 - S_2 = 2(l_1 - l_2)$$

(5.3)



รูปที่ 5.7 แสดงการจัดอุปกรณ์ด้วยวิธีไมเคิลสัน อินเทอร์เฟอโรมิเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะมารวมกันที่อุปกรณ์ตรวจจับ ความเข้มแสงที่วัดได้ขณะที่ M_1 เคลื่อนที่ตามแนวแกนแสงจะมีค่าเป็น

$$I = \frac{1}{2} [A_1^2 + A_2^2 + A_1 A_2 \cos 2k(l_1 - l_2)] \quad (5.4)$$

เมื่อ A_1 เป็น แอมพลิจูดของสนามไฟฟ้าของคลื่นแสงที่ตกกระทบและสะท้อนกลับจากกระจก M_1
 A_2 เป็น แอมพลิจูดของสนามไฟฟ้าของคลื่นแสงที่ตกกระทบและสะท้อนกลับจากกระจก M_2
 k เป็นเวฟเวกเตอร์ $= \frac{2\pi}{\lambda}$

สำหรับกรณี $A_1 = A_2 = A$ จะได้

$$I = A^2 [1 + \cos 2k(l_1 - l_2)] \quad (5.5)$$

ถ้านำฉากมารับภาพแทนเครื่องอุปกรณ์รับแสง จะได้วิวรอยของการแทรกสอด มีมืด และสว่าง สลับกันไป ซึ่งแนววิวรอยของการแทรกสอดนี้จะชัดเจนมากน้อยขึ้นอยู่กับแหล่งกำเนิดแสงนั้นมีคุณสมบัติโคฮีเร้นซ์มากน้อยเพียงใดด้วย และเพื่อที่จะเป็นการวัดค่าโคฮีเร้นซ์ให้ชัดเจนขึ้น กำหนดให้ค่าความชัดเจนของวง (The visibility of the fringes) เป็น V ดังสมการ 5.6

$$V = \frac{(I_{\max} - I_{\min})}{(I_{\max} + I_{\min})} \quad (5.6)$$

I_{\max} คือค่าสูงสุดของความเข้มที่ปรากฏบนฉากรับภาพหรืออุปกรณ์รับแสง

I_{\min} คือค่าต่ำสุดของความเข้มที่ปรากฏบนฉากรับภาพหรืออุปกรณ์รับแสง

เมื่อกรณีที่คลื่นแสงสองคลื่นเกิดการแทรกสอดซึ่งกันและกันแล้วทำให้ค่า V เท่ากับ 1 แสดงว่าคลื่นแสงนั้นมีความเป็นโคฮีเร้นซ์สมบูรณ์ (Perfect coherence) แต่ถ้าเท่ากับ 0 แสดงว่าคลื่นแสงนั้นไม่มีความเป็นโคฮีเร้นซ์

ผลที่ได้จากแถบมืดสว่างนี้สามารถที่จะนับจำนวนวิวรอยของการแทรกสอด ทำให้สามารถทราบผลต่างของระดับความสูงของลำปรอท โดยการประมวลผลข้อมูลด้วยคอมพิวเตอร์ ผ่านอินเตอร์เฟสการ์ด ET-DIO CARD ด้วยโปรแกรมคำนวณภาษาปาสคาล ดังภาคผนวก ฉ. ด้วยหลักการที่ว่าระยะห่างระหว่างแถบมืดหรือสว่างที่ติดกันเป็น $\lambda/2$ ถ้านับได้ n ครั้ง ของแถบมืด หรือ สว่าง แล้ว ก็ทราบระยะ (h) ได้ ดังสมการที่ (5.7)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$h = n \cdot \frac{\lambda}{2} \quad (5.7)$$

- เมื่อ h เป็นระยะผลต่างของลำปรอท
 λ เป็นความยาวคลื่น ในที่นี้มีค่า 633 นาโนเมตร
 n เป็นจำนวนครั้งที่เกิดแถบมืด หรือ สว่าง

5.5 การทดสอบระบบ

ได้ทำการทดสอบระบบของเครื่องมือในการวัดค่าความดันจากการประมวลผลข้อมูลด้วยคอมพิวเตอร์เมื่อผ่านอินเตอร์เฟซการ์ด โดยใช้โปรแกรมคำนวณในภาษาปาสคาล ด้วยการป้อนค่าความดันที่ทราบค่า เปรียบเทียบกับผลของค่าความดันที่วัดได้และแสดงออกมาทางจอคอมพิวเตอร์ ในส่วนนี้ดังรูปที่ 5.1 แสดงองค์ประกอบรวมของชุดเครื่องวัดความดันมาตรฐานที่สร้างขึ้น และรูปที่ 5.8 แสดงอุปกรณ์รวมที่ใช้ในระบบ



รูปที่ 5.8 แสดงอุปกรณ์รวมที่ใช้ในระบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.6 สรุป

ในบทนี้ได้อธิบายถึงขั้นตอนในการดำเนินงานวิจัย ที่เริ่มต้นด้วยการออกแบบเครื่องวัดความดันมาตรฐานขั้นปฐม ด้วยการให้หลักการเลียนแบบจากเครื่อง Primary pressure standard ของบริษัท BAT โดยได้กล่าวถึงโครงสร้างของอุปกรณ์ที่ใช้ในระบบประกอบด้วย ส่วนโครงสร้างหลักเพื่อบรรจุปรอท ระบบทางแสง และส่วนของการประมวลผลข้อมูลทางคอมพิวเตอร์ด้วยอินเตอร์เฟซการ์ด และการทดสอบของระบบเครื่องมือวัดความดันของงานวิจัยที่สร้างขึ้น เพื่อให้สามารถวัดค่าความดันได้



บทที่ 6 ผลการวิจัย

ในบทนี้จะเสนอรายละเอียดและขั้นตอนในการทดลองของผลที่ได้จากการทดลอง ตลอดจนการอภิปรายและสรุปผลจากการทดลองตามที่เสนอไว้ในบทที่ 5

6.1 ผลการทดสอบระบบรวม

โดยหลักการนั้น ค่าความดันวัดได้จากความสัมพันธ์ของความหนาแน่นของปรอท ค่าแรงโน้มถ่วงของโลก และผลต่างของระดับความสูงของลำปรอท

ค่าความหนาแน่นของปรอทมีค่าเป็น 13.5 g/cm^3

ค่าแรงโน้มถ่วงของโลกเป็น 9.78303959 m/s^2

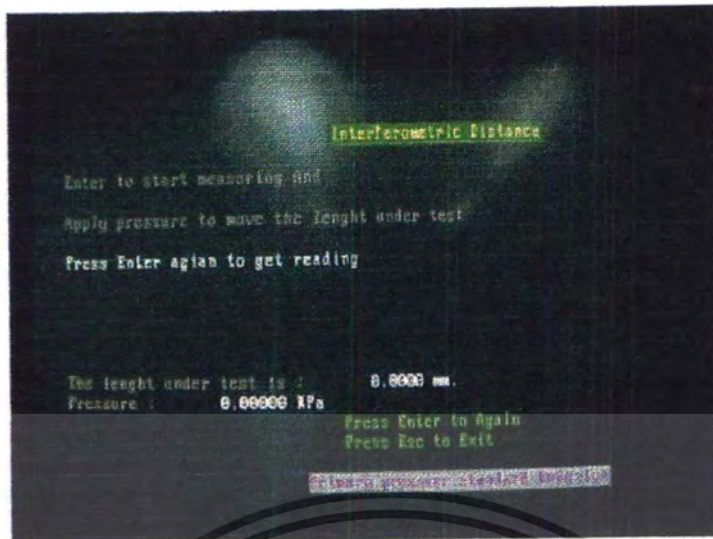
ผลต่างของระดับความสูงของลำปรอท ใช้วิธีการวัดด้วยระบบเชิงแสง ดังที่กล่าวมาแล้ว

ค่าความดันที่วัดได้จากการป้อนค่าความดัน (Generate pressure) ต่อกับ เกจวัดความดันใดๆ ซึ่งโดยเป้าหมายจริงแล้วนั้น เกจความดันนี้จะเป็นเครื่องมือที่ต้องการจะสอบเทียบ (Calibrated) กับเครื่องวัดความดันมาตรฐานชั้นปฐมที่สร้างขึ้น เปรียบเทียบผลของค่าทั้งสอง โดยที่ไม่พิจารณาว่าตัวไหนเป็นตัวอ้างอิงและตัวถูกสอบเทียบ ดังรูปที่ 6.1 สำหรับค่าความดันที่อ่านได้จากงานวิจัยแสดงค่าบนจอคอมพิวเตอร์แสดงตัวอย่างดังรูปที่ 6.2 และ 6.3



รูปที่ 6.1 แสดงการทดสอบในการวัดค่าความดัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.2 แสดงผลของการวัดค่าความดันจากงานวิจัย เมื่อเริ่มต้น

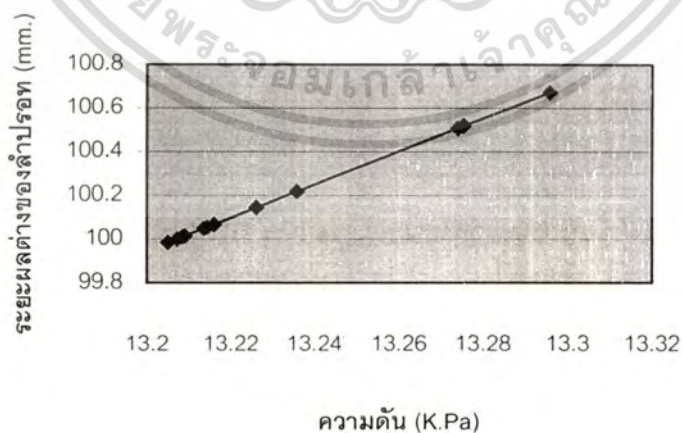


รูปที่ 6.3 แสดงผลของการวัดค่าความดันจากงานวิจัย เมื่อมีการป้อนค่าความดัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 6.1 แสดงผลการวัดที่ความดัน 15 K Pa

เกจเครื่องวัดความดันที่ 15 Kpa		
n	ค่าความดันจากเครื่อง ที่สร้างขึ้น (Kpa)	ระยะ h (mm)
1	13.20722	100.0009
2	13.20841	100.0099
3	13.20901	100.0144
4	13.20504	99.9844
5	13.21352	100.0486
6	13.21424	100.0540
7	13.22612	100.1440
8	13.21598	100.0672
9	13.23579	100.2172
10	13.27541	100.5172
11	13.27398	100.5064
12	13.29578	100.6714
\bar{x}	13.23171	100.1863
S.D	0.03176	0.2405

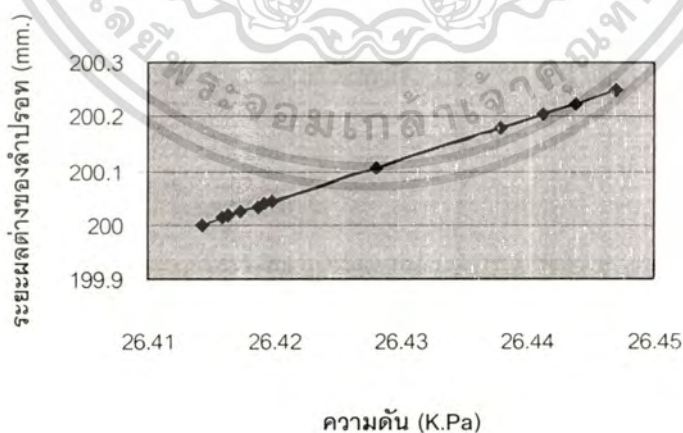


รูปที่ 6.4 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความดัน กับระยะผลต่างของลำปรอทที่ 15 KPa

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 6.2 แสดงผลการวัดที่ความดัน 25 K Pa

เกจเครื่องวัดความดันที่ 25 KPa		
n	ค่าความดันจากเครื่อง ที่สร้างขึ้น (Kpa)	ระยะ h (mm)
1	26.41433	200.0009
2	26.41591	200.0129
3	26.41631	200.0159
4	26.41730	200.0234
5	26.41868	200.0339
6	26.42803	200.1047
7	26.44388	200.2247
8	26.44131	200.2052
9	26.43790	200.1794
10	26.41983	200.0426
11	26.41924	200.0381
12	26.44697	200.2481
\bar{x}	26.42664	200.0942
S.D	0.01235	0.0936

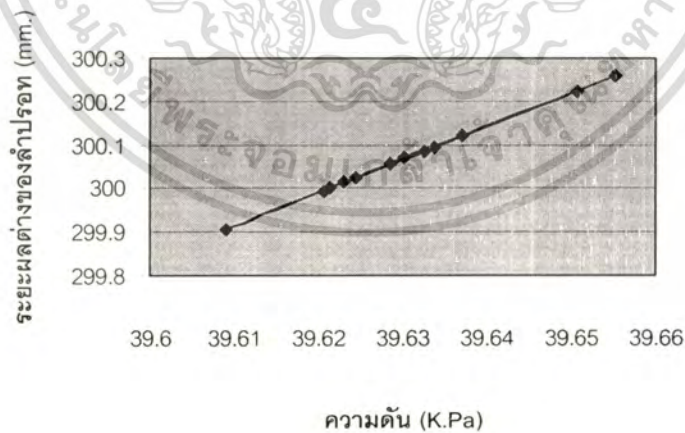


รูปที่ 6.5 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความดัน กับระยะผลต่างของลำปรอทที่ 25 KPa

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 6.3 แสดงผลการวัดที่ความดัน 40 K Pa

เกจวัดความดันที่ 40 KPa		
n	ค่าความดันจากเครื่อง ที่สร้างขึ้น (Kpa)	ระยะ h (mm)
1	39.62143	300.0009
2	39.62064	299.9949
3	39.62460	300.0249
4	39.63387	300.0951
5	39.63034	300.0684
6	39.62852	300.0546
7	39.63704	300.1191
8	39.65067	300.2223
9	39.62313	300.0138
10	39.60903	299.9070
11	39.63272	300.0864
12	39.65523	300.2568
\bar{x}	39.63060	300.0704
S.D	0.01283	0.0971

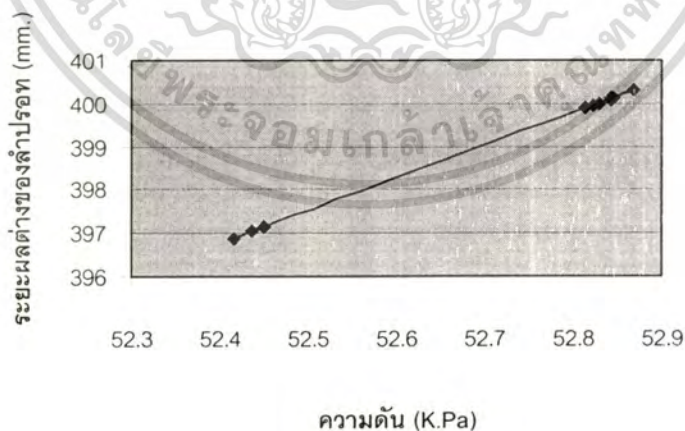


รูปที่ 6.6 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความดัน กับระยะผลต่างของลำปรอทที่ 40 KPa

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

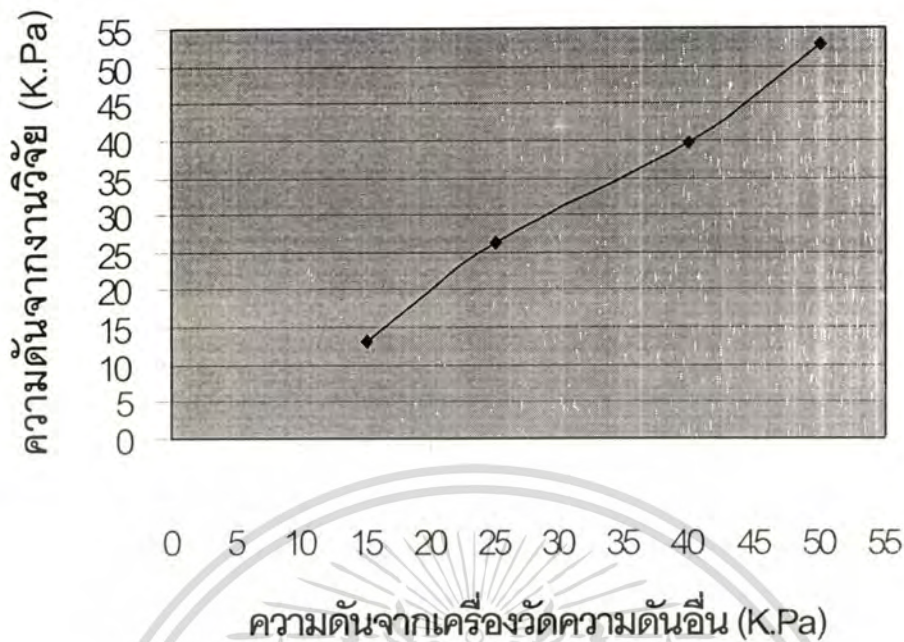
ตารางที่ 6.4 แสดงผลการวัดที่ความดัน 50 K Pa

เกจเครื่องวัดความดันที่ 50 Kpa		
n	ค่าความดันจากเครื่อง ที่สร้างขึ้น (Kpa)	ระยะ h (mm)
1	52.82853	400.0009
2	52.82952	400.0084
3	52.81320	399.8848
4	52.82342	399.9622
5	52.84426	400.1200
6	52.86728	400.2943
7	52.84212	400.1038
8	52.84418	400.1194
9	52.84509	400.1263
10	52.44892	397.1266
11	52.41508	396.8704
12	52.43656	397.0330
\bar{x}	52.73652	399.3042
S.D	0.18335	1.3882



รูปที่ 6.7 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความดัน กับระยะผลต่างของลำปรอทที่ 50 KPa

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.8 แสดงความเป็นเชิงเส้นของค่าความดันที่วัดได้

ผลการวัดเมื่อป้อนค่าความดัน โดยยึดค่าจากสเกลของเกจวัดความดันอ่านผลการเปรียบเทียบค่าความดันของเกจวัดความดัน กับ เครื่องวัดความดันมาตรฐานที่สร้างขึ้นนั้นเป็นไปตามรูปที่ 6.8 แสดงความเป็นเชิงเส้นของค่าความดันที่วัดได้

6.2 สรุปและอภิปรายผล

การหาค่าความดันจากเครื่องมือวัดความดันมาตรฐานขั้นปฐม ด้วยการใชหลักการ Interferometric mercury barometer นั้น จุดที่สำคัญคือการนับวัฏรอบของการแทรกสอด โดยการส่องแสงเข้าสู่ชุด Michelson interferometer เมื่อสามารถทำการนับจำนวนวัฏรอบของการแทรกสอดได้ก็สามารถหาในเทอมของระยะได้จากค่าความยาวคลื่นของแหล่งกำเนิดแสง ทำให้สามารถอ่านระยะได้ในความละเอียด 0.0003 mm ($0.3 \mu\text{m}$) ดังนั้นค่าความละเอียดของความดันที่วัดได้จากเครื่องมือที่สร้างขึ้นนี้จึงมีความละเอียดตามไปด้วยเช่นกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทสรุปและการประยุกต์ใช้งาน

7.1 บทสรุป

ในปัจจุบันนี้การทดสอบเครื่องมือวัดความดันของโรงงานอุตสาหกรรม และหน่วยงานอื่นๆ ที่เกี่ยวข้องเป็นเรื่องที่ไม่สามารถที่จะหลีกเลี่ยงได้ ประกอบกับในสถานะของเศรษฐกิจเช่นนี้ การที่สั่งซื้อเครื่องมือจากต่างประเทศเข้ามานั้นเป็นการสิ้นเปลือง ดังนั้นเครื่องมือวัดความดันมาตรฐานชั้นปฐมชนิดมาโนมิเตอร์ ที่ได้ทำการศึกษาและวิจัยนี้ จึงนับได้ว่าเป็นการแก้ปัญหาส่วนหนึ่ง ทั้งนี้ เมื่อสามารถยืนยันการสอบเทียบของปริมาณพื้นฐาน ในค่าความถูกต้องที่มั่นใจในแต่ละระดับได้อย่างแม่นยำ

งานศึกษาและวิจัยสำหรับการสร้างเครื่องมือวัดความดันมาตรฐานชั้นปฐมนี้ เป็นการวัดค่าความดันเกจ ด้วยความสัมพันธ์ของความหนาแน่นของปรอท ค่าแรงโน้มถ่วงของโลก และผลต่างของระดับความสูงของลำปรอท ในหลอดแก้วทั้งสองด้าน โดยที่สองปริมาณยกเว้นค่าระยะของผลต่างของระดับความสูงของลำปรอท เป็นค่าคงที่ ที่นำมาใช้ ทั้งนี้ได้มีการสอบย้อนกลับของปริมาณทั้งสองด้วยเช่นกัน ดังนั้นปริมาณที่สำคัญในการวัดค่าความดันของงานศึกษาและวิจัยนี้จึงมุ่งไปที่การหาค่าระยะของผลต่างของระดับความสูงของลำปรอท ในค่าที่ละเอียดแม่นยำและถูกต้อง ด้วยการให้หลักการของแสงในปรากฏการณ์แทรกสอดโดยใช้วิธี Michelson interferometric เพื่อทำการตรวจนับริ้วรอยของการแทรกสอด แล้วนำมาวิเคราะห์ประมวลผล ทำให้ทราบระยะทางออกมา โดยใช้การประมวลผลด้วยคอมพิวเตอร์ผ่านอินเตอร์เฟสการ์ด ชนิด ET-DIO CARD แล้วคำนวณค่าความดันที่อ่านได้ด้วยโปรแกรมภาษาปาสคาล จากขีดจำกัดของความสูงของหลอดแก้วรูปตัวยู และระดับผลต่างของลำปรอททั้งสองข้างมากที่สุดเป็น 1 เมตร ดังนั้นเครื่องมือวัดความดันมาตรฐานชั้นปฐมที่สร้างขึ้นสำหรับงานวิจัยนี้จึงสามารถวัดค่าความดันสูงสุด 130 K Pa โดยมีค่าความละเอียด ของผลต่างของระยะของลำปรอทเป็น 0.0003 mm. และได้ทำการทดสอบระบบของเครื่องมือวัดความดันมาตรฐานนี้ ในระบบทางแสง เพื่อให้มั่นใจว่าสามารถนับจำนวนริ้วรอยของการแทรกสอดได้ ทำให้ได้ในหน่วยของระยะทางอย่างถูกต้อง โดยหาเงื่อนไขที่เหมาะสมกับระบบที่ออกแบบไว้ อันเกี่ยวเนื่องมาจากข้อกำหนดของอุปกรณ์ในระบบนั่นเอง อีกส่วนหนึ่งที่ทำการศึกษาทดสอบก็เป็นทั้งระบบรวมด้วยการเปรียบเทียบผลของการวัดความดันกับเกจวัดความดันอื่นในความดันที่ป้อนเดียวกัน

ปัจจัยที่เห็นได้ชัดถึงความสามารถและขีดจำกัดของเครื่องมือวัดความดันมาตรฐานที่สร้างขึ้น นี้ก็คือในส่วนของระบบทางแสง อันได้แก่ การจัดแนวลำแสงให้เหมาะสมและที่สุด รวมไปถึง อุปกรณ์ในส่วนอื่นๆ ทั้งแหล่งกำเนิดแสง ตัวรับ

7.2 ปัญหาที่เกิดขึ้น

งานวิจัยที่ศึกษาและสร้างขึ้นมานี้ เป็นการออกแบบเครื่องมือที่ต้องนำอุปกรณ์ทางแสง และ อุปกรณ์อื่นๆ ประกอบขึ้นเป็นเครื่องมือนี้ขึ้นมา นั่น ซึ่งปัญหาที่พบในส่วนของอุปกรณ์คือในส่วนของอุปกรณ์ทางแสงมีราคาค่อนข้างแพง เนื่องจากขีดจำกัดทางเทคโนโลยีของประเทศเรา จึงทำให้การเลือกใช้อุปกรณ์ในการทดลองยังมีขอบเขตจำกัด เช่น เลือกใช้แหล่งกำเนิดคลื่นแสงที่มีความยาวคลื่น 633 นาโนเมตร เพียงอย่างเดียว โดยไม่ได้เปรียบเทียบกับแหล่งกำเนิดคลื่นแสงที่มีความยาวคลื่น และ คุณสมบัติอื่นๆ ที่แตกต่างกันออกไป

ในส่วนของโครงสร้างหลักที่ใช้เป็นแกนร่วมกับ หลอดแก้วรูปตัวยู นี้ จำเป็นที่จะต้องมีความมั่นคง แข็งแรงที่สามารถรับน้ำหนักรวมของในส่วนของระบบทางแสงได้ เพื่อที่สามารถจัดแนวลำแสงได้ด้วยดี

นอกจากปัญหาเครื่องมือที่ใช้แล้ว ปัญหาทางด้านการตรวจเช็คก็เป็นปัญหาหนึ่งที่เกิดขึ้น คือไม่สามารถควบคุมความดันที่ป้อนได้ที่ค่าๆ เดียว ดังนั้นจำนวนรีวรอยของการแทรกสอดที่ได้ก็ไม่แน่นอน ด้วยทำให้ระยะทางและค่าความดันที่วัดได้นั้นไม่เท่ากัน แก้ปัญหาด้วยการทำซ้ำหลายๆ ครั้ง สำหรับปัญหาสุดท้ายเกิดจากผู้วิจัยในด้านของประสบการณ์ในการจัดแนวลำแสง

7.3 แนวทางในการพัฒนาต่อไป

ดังได้กล่าวไว้ในตอนต้นแล้วว่าการศึกษาและการวิจัยนี้เป็นจุดเริ่มต้นของการพัฒนาเทคโนโลยีทางด้านมาตรวิทยา ในแขนงของด้านความดัน เพื่อเป็นแนวทางในการออกแบบและพัฒนาเครื่องมือให้สามารถสอบเทียบยังเครื่องมือในระดับใช้งานต่อไป แนวในการพัฒนาต่อไปนั้น ในด้านของโครงสร้างหลักที่ออกแบบ และในส่วนของระบบทางแสงไม่ว่าจะเป็นในด้านแหล่งกำเนิดแสง และตัวรับ รวมทั้งชนิดของ sensor ด้วย นอกจากนี้แล้วควรพิจารณาในส่วนของปรอทเอง เมื่อมีการป้อนค่าความดัน การเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นย่อมมีผลกับของเหลวปรอทดังกล่าว เป็นต้นว่า อุณหภูมิของปรอท ดังนั้นควรมีตัววัด หรือทำการทดลองเพิ่มเติมเพื่อหาปัจจัยดังกล่าวที่จะส่งผลต่อค่าความดันที่วัด เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

7.4 การประยุกต์ใช้งาน

การประยุกต์ใช้งานจากการศึกษาวิจัยการสร้างเครื่องมือวัดความดันมาตรฐานขั้นปฐมุนั้น สามารถนำไปวัดจริงได้ และจากบางส่วนของเครื่องมือชุดนี้โดยเฉพาะในส่วนเชิงแสง นั้น สามารถที่จะนำไปใช้ประกอบในการสอบเทียบทางด้านมาตรวิทยาทางความยาวได้ และเนื่องจากเทคโนโลยีทางด้านแสง และการตรวจสอบเครื่องมือวัดนั้น นับวันจะมีบทบาทในชีวิตประจำวันของมนุษย์มากขึ้น ดังนั้นจึงต้องมีการพัฒนาและศึกษาค้นคว้าต่อไป รวมทั้งเผยแพร่ความรู้ และเทคโนโลยีนี้ให้เป็นที่รู้จักกันแพร่หลายและสามารถนำมาใช้งานได้อย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งผู้จัดทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้หวังเป็นอย่างยิ่งว่าวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะ เป็นแนวทางที่ดีต่อการพัฒนาเทคโนโลยีดังกล่าวให้เกิดขึ้นภายในประเทศในเวลาอันใกล้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

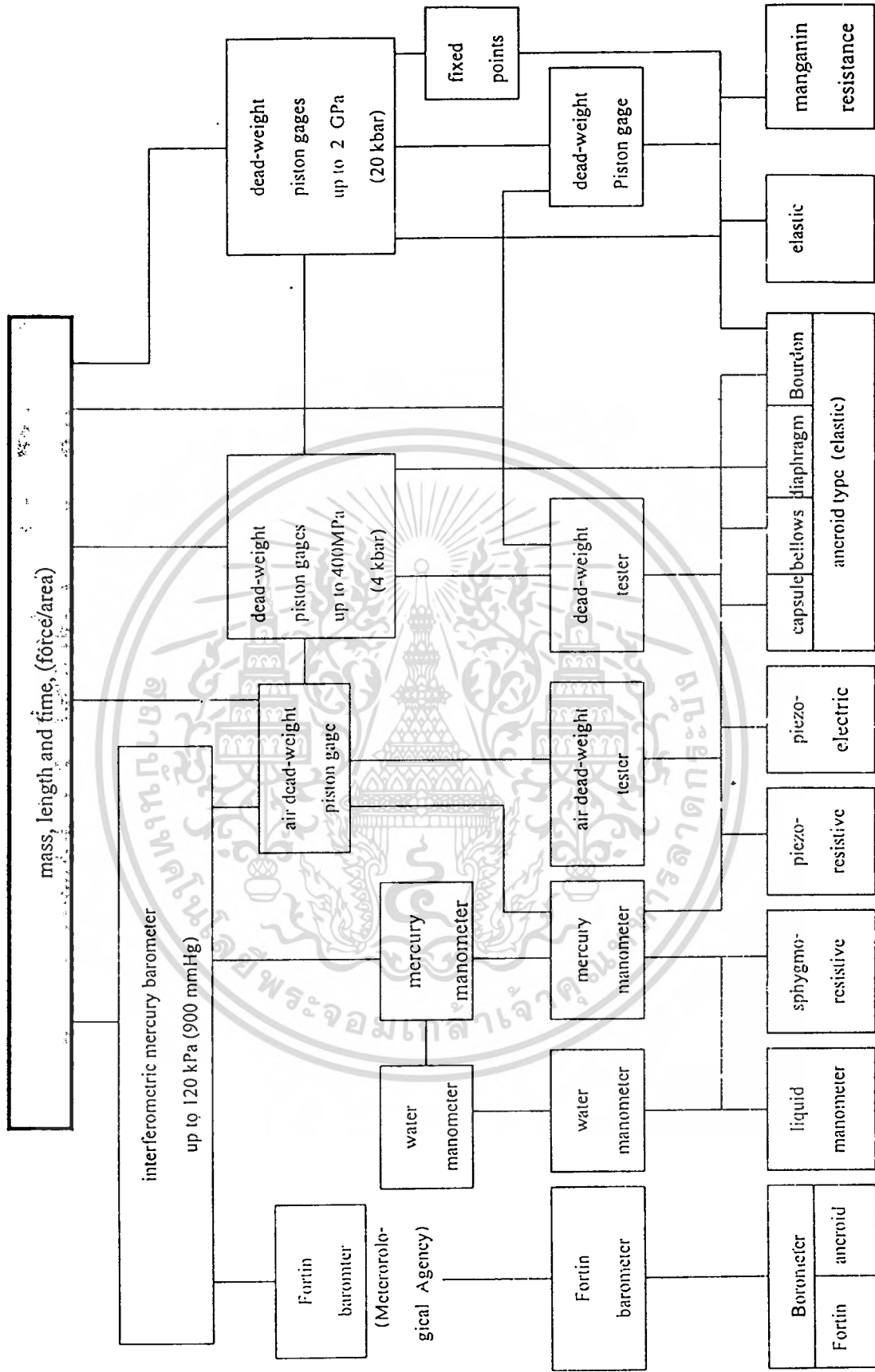
- [1] Frank L. et. al. **Introduction to Optics**, Prentice Hall , Engwood Cliff, New Jersey, 1987.
- [2] Jones, E.B. “Instrument Technology”, **Measurement of Pressure**, Vol.1, pp 5-35, 1965.
- [3] Dadson, R. S., Greig, R. G. P. and Horner, Angela “Developments in The Accurate Measurement of Pressure”, **Metrologia**, Vol. 1, pp 55-68, 1965.
- [4] Peggs, G. N., Elliott, K. W. T. and Lewis, Sylvia “The Intercomparison Between a Primary Standard Mercury Barometer and a Gas-operated Pressure Balance Standard”, **Metrologia**, Vol. 15, pp 77-85.
- [5] Peggs, G. N. and Lewis, Sylvia “The NPL Primary Pressure Balance Standard”, **Sci. Instrument**., Vol. 10, pp 1028-1034, 1977.
- [6] Peggs, G. N. “A method for Computing the Effective Area of a Pressure Balance from Diametral Measurement”, **NPL Report MOM23**, 1976.
- [7] Swidells, B. S. “Calibration of Load Cell Systems to Measure Weight”, **NPL Report MOM15**, 1975.
- [8] Kurt Solis, Ken Kolb, “Static Pressure Measurement and Calibration Seminar Manual.” **Ruska Instrument Corporation**, 1993.
- [9] Charies R. Tilford, “Pressure and Vacuum Measurements,” ISBN 0-471-57087-7. 1992.
- [10] Wutz, Adam, Walcher, **Theory and Praction of Vacuum Technology**, Chapman and Hall, London, pp. 15-45.
- [11] British Standard 1780 : part 1 and Part 2, **Bourdon Tube Pressure and Vacuum Gauges**, 1971.
- [12] Australian Standard 1349 : **Bourdon Tube Pressure and Vacuum Gauges**, 1973.
- [13] B. Le Neindre and B. Vodar, **Experimental Thermodynamics of Non-Reaction Fluids, Pure and Applied Chemistry**, 1975.
- [14] Pressure Measurements and Standards, **Group Training Course in Metrology and Measurement Standard**, JICA, JMI and NRLM, 1986.
- [15] Donald G.S. Groeneveld, **The Calibration of Pressure Instruments using a Pressure Standard**, CSIRO, Australia, 1992.

- [16] Dr. Charles D. Ehrlich, Training Course “**Calibration and use of Piston Gauge**”, NIST, Gaithsburg, Washington D.C., U.S.A., 1992, pp.14-37.
- [17] Donald B. Francis, **Basic Concepts of Manometre**, Ruska Instrument Corporation, 1992, pp.1-56.
- [18] ISO TAG 4: **Guide to the expression of uncertainty in measurement**. 1993.
- [19] WECC (Western European Calibration Cooperation) Doc.19, **Guidlines for the Expression of the Uncertainty of Measurement in Calibrations**, 1990.
- [20] Seung Woong Han, **Pressure Standard**, KSRI (KRISS), 1985, pp.13-25.
- [21] รศ.ดร. วิทยา ขงเจริญ, เอกสารอบรมทางวิชาการ เรื่องเครื่องมือวัดและควบคุมกระบวนการผลิตในอุตสาหกรรม “การวัดความดัน”, ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 1982.





เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ก.1 แสดงการสอบย้อนกลับของการวัดความดัน



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติความเป็นมาโดยย่อ

- พ.ศ. 2336 ประเทศฝรั่งเศสเริ่มมีการกำหนดใช้หน่วยการวัดในระบบเมตริก (metric system) (ค.ศ. 1793)
- พ.ศ. 2416 ประเทศอังกฤษกำหนดให้มีการใช้ระบบเซนติเมตร กรัม วินาที (c.g.s. system) (ค.ศ. 1793) การวัดทางวิทยาศาสตร์อีกระบบหนึ่ง
- พ.ศ. 2419 ได้เริ่มมีการประชุม CGPM (Commference General des Poids et Mesures หรือ (ค.ศ. 1876) General Conference on Weights and Measures) ณ กรุงปารีส
- พ.ศ. 2443 ได้มีการใช้ระบบเมตริก กิโลกรัม และวินาที (MKS system) เป็นระบบการวัดใน (ค.ศ. 1900) ทางวิทยาศาสตร์ประยุกต์
- พ.ศ. 2493 โดยที่เห็นว่า ได้มีความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยทางกลศาสตร์และหน่วยทางแม่ (ค.ศ. 1950) เหล็กไฟฟ้า จึงได้เพิ่มแอมแปร์ ซึ่งเป็นหน่วยของกระแสไฟฟ้าให้เป็นหน่วยที่ 4 ในระบบ MKS และเรียกเสียใหม่ว่าระบบ MKSA
- พ.ศ. 2503 ได้มีการประชุมครั้งที่ 11 ของ CGPM และตกลงให้มีระบบการวัดปริมาณต่างๆ (ค.ศ. 1960) เป็นระบบมาตรฐานระหว่างชาติ เรียกชื่อว่า “Systeme International d’Unites” และกำหนดให้ใช้อักษรย่อแทนชื่อระบบนี้ว่า “SI” เพื่อใช้ในการวัดทางวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

หน่วย SI

หน่วย SI ประกอบด้วยหน่วยฐาน หน่วยเสริม หน่วยอนุพัทธ์ และคำอุปสรรค ซึ่งใช้แทนตัวพหุคูณในหน่วยต่างๆ ในที่นี้จะให้ละเอียดเฉพาะหน่วยฐาน ซึ่งสัมพันธ์กับมาตรวิทยาโดยตรง

ตารางที่ ข.1 แสดงหน่วยฐาน ซึ่งใช้เป็นหลักของหน่วยเอสไอ มี 7 หน่วย คือ

ปริมาณกายภาพ (Physical Quantity)	หน่วย (Unit)	สัญลักษณ์ (Symbol)
length (l) ความยาว	metre เมตร	m
mass (m) มวล	kilogram กิโลกรัม	kg
time (t) เวลา	second วินาที	s

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.1 (ต่อ) แสดงหน่วยมูลฐาน

ปริมาณกายภาพ (Physical Quantity)	หน่วย (Unit)	สัญลักษณ์ (Symbol)
electric current (I) กระแสไฟฟ้า	ampere แอมแปร์	A
thermodynamic temperature (T) อุณหภูมิอุณหพลวัต	kelvin เคลวิน	K
luminous intensity (I_v) ความเข้มของการส่องสว่าง	candela แคนเดลา	cd
amount of substance (n) ปริมาณของสาร	mole โมล	mol

นิยาม :

เมตร (m)

The metre is the length equal to 1 650 763.73 wavelengths in vacuum of the radiation corresponding to the transition between the $2p_{10}$ and $5d_5$ to krypton-86 atom.

เมตรคือความยาวที่เท่ากับ 1 650 763.73 เท่าของความยาวคลื่นในสุญญากาศของการแผ่รังสีที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงระดับพลังงานของอะตอมคริปทอน-86 ระหว่างระดับ $2p_{10}$ กับ $5d_5$

กิโลกรัม (kg)

The kilogram is the unit of mass; it is equal to the mass of the international prototype of the kilogram. (It is in the Bureau International des Poids et Mesures at Sevre, near Paris, France)

กิโลกรัมคือหน่วยของมวลซึ่งเท่ากับมวลต้นแบบระหว่างชาติของกิโลกรัม (มวลต้นแบบนี้เก็บรักษาไว้ที่สำนักงานมาตราชั่งดวงวัดระหว่างชาติที่ แซร์เรอ ใกล้กับกรุงปารีส ประเทศฝรั่งเศส)

วินาที (s)

The second is the duration of 9 192 631 770 periods of the radiation corresponding to the transition between two specific hyperfine levels of the fundamental state of the cesium-133 atom.

วินาทีคือช่วงเวลา 9 192 631 770 เท่าของคาบการแผ่รังสีที่เกิดจากการเปลี่ยนระดับพลังงานของอะตอมซีเซียม-133 ระหว่างระดับไฮเพอร์ไฟน์สองระดับของสถานะมูลฐาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้เพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น เมื่อผู้ยืมได้เห็นว่าไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แอมแปร์ (A)

The ampere is the intensity of a constant current which when maintain in two parallel rectilinear conductors of infinite length of negligible cross section, and placed at a distance of 1 metre from each other in vacuum, would produce between the conductors a force equal to 2×10^{-7} M.K.S.units of force per metre length.

แอมแปร์ คือความเข้มของกระแสคงตัว ซึ่งเมื่อให้อยู่ในตัวนำ 2 เส้นที่มีความยาวไม่จำกัดและมีพื้นที่หน้าตัดน้อยจนไม่ต้องคิด ซึ่งวางอยู่คู่ขนานห่างกัน 1 เมตร ในสุญญากาศแล้วจะทำให้เกิดแรงระหว่างตัวนำทั้งสองเท่ากับ 2×10^{-7} หน่วยเอ็ม. เค. เอส. ต่อความยาว 1 เมตร

เคลวิน (K)

The 10th General Conference of Weights and Measures decided to defined the thermodynamic scale of temperature by means of the triple point of water as fixed fundamental point. by giving it the temperature 273.16 Kelvin, exactly. (Note – For puepose of practical, the General Conference of Weights and Measures has adopted the ‘International Temperature Scale of 1948’, in which temperature is measured in degree Celsius($^{\circ}$ C). At this international conference the name Celsius was adopted in place of the word centigrade, commonly used in many countries.)

ที่ประชุมใหญ่แห่งมาตราชั่งตวงวัดครั้งที่ 10 ได้วินิจฉัยให้นิยามมาตราส่วนอุณหภูมิโดยอาศัยจุดร่วมสามของน้ำเป็นจุดตั้งมูลฐาน และให้จุดดังกล่าวมีอุณหภูมิเท่ากับ 273.16เคลวินอย่างเที่ยงตรง

(หมายเหตุ-เพื่อวัตถุประสงค์ในการวัดทางปฏิบัติ ที่ประชุมใหญ่แห่งมาตราชั่งตวงวัดได้รับรอง “มาตราส่วนอุณหภูมิระหว่างชาติ 1948” ซึ่งใช้อุณหภูมิเซลเซียส ($^{\circ}$ C) สำหรับการวัดอุณหภูมิและในการประชุมระหว่างชาติครั้งนั้นเองที่ได้มีการรับรองการใช้ชื่อเซลเซียสแทนคำว่าเซนติเกรด ซึ่งใช้กันอยู่ทั่วไปในหลายประเทศ)

แคนเดลา (cd)

The candela is the luminous intensity, in the perpendicular direction, of a surface of $1/600\ 000$ square metre of a black body at the temperature of freezing platinum under a pressure of 101 325 newton per square metre.

แคนเดลา คือ ความเข้มของการส่องสว่างในทางตั้งฉากของพื้นผิววัตถุดำที่มี พื้นที่ $1/600\ 000$ ตารางเมตร ณ อุณหภูมิซึ่งธาตุแพลทินัมเริ่มแข็งตัว ภายใต้ความดัน 101 325 นิวตันต่อตารางเมตร

โมล (mol)

The mole is an amount of substance of a system which contains as many elementary units as there are carbon atom in 0.012kg (exactly) of ^{12}C

โมลคือ ปริมาณของสารในระบบซึ่งประกอบด้วยจำนวนหน่วยฐานเทียบเท่ากับจำนวนอะตอมของคาร์บอนในคาร์บอน-12 ปริมาณ 0.012 กิโลกรัมพอดี



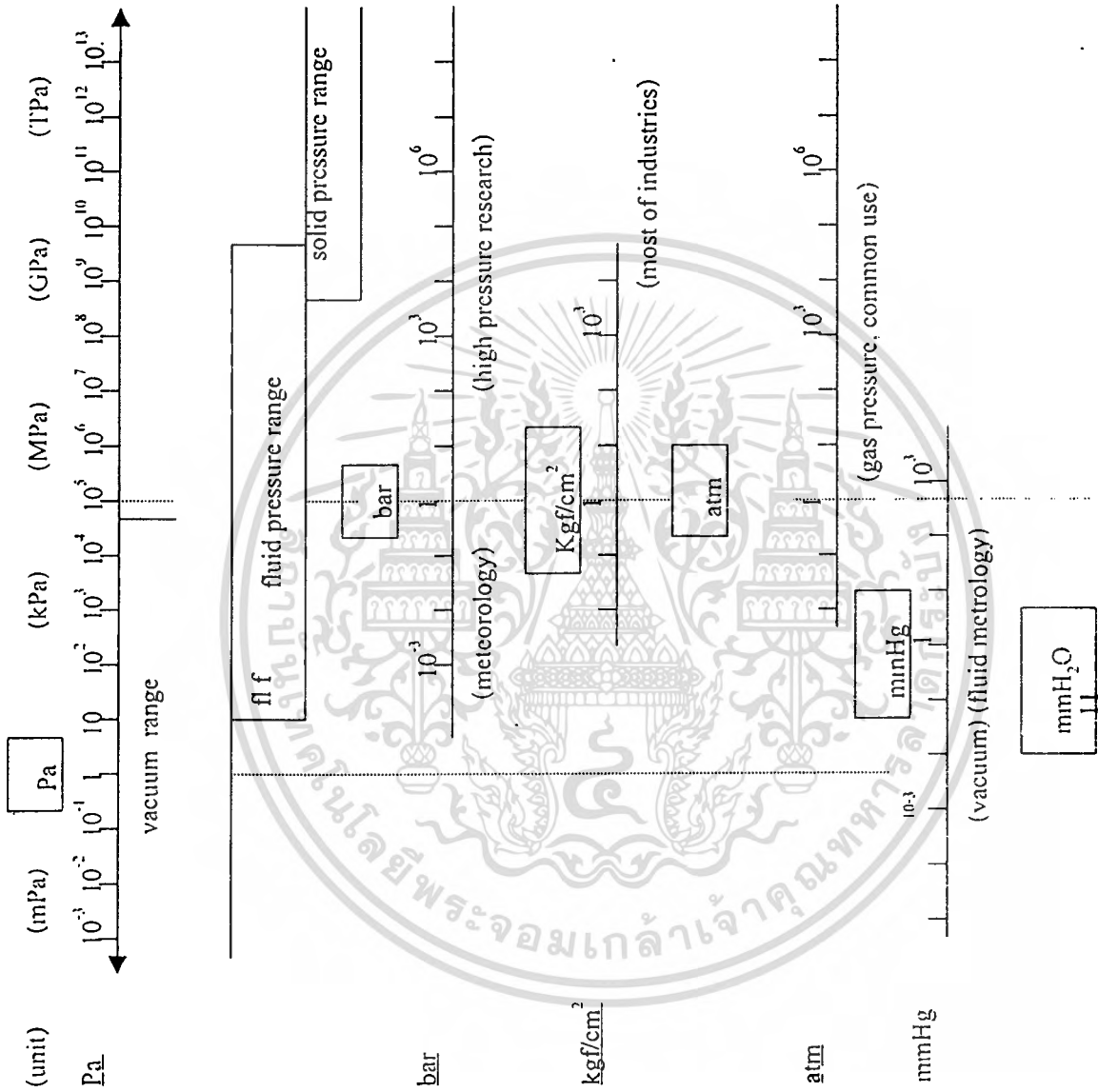
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก ค.

แสดงความสัมพันธ์ของหน่วยวัดความดันในระบบ SI

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ค.1 แสดงความสัมพัทธ์ของหน่วยวัดความดันในระบบ S-I

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ง.1 ค่าแฟกเตอร์ในการแปลงหน่วยทางด้านความดัน

unit	Pa (N/m ²)	kgf/cm ²	mHg	mH ₂ O	atm	bar	mmHg
gf/cm ²	98066.5	1	0.735559	10	0.967841	0.980665	735.559
mHg	133322.4	1.35951	1	13.5951	1.315789	1.333224	1000
mH ₂ O	9806.65	0.1	0.073559	1	0.0967841	0.0980665	73.5559
atm	101325	1.033228	0.76	10.33228	1	1.01325	760
bar	100000	1.019716	0.750062	10.19716	0.986923	1	750.062
mmHg	133.3224	0.00135951	0.001	0.0135951	0.001315789	0.00133324	1



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Equivalent for Unit Value in First Column

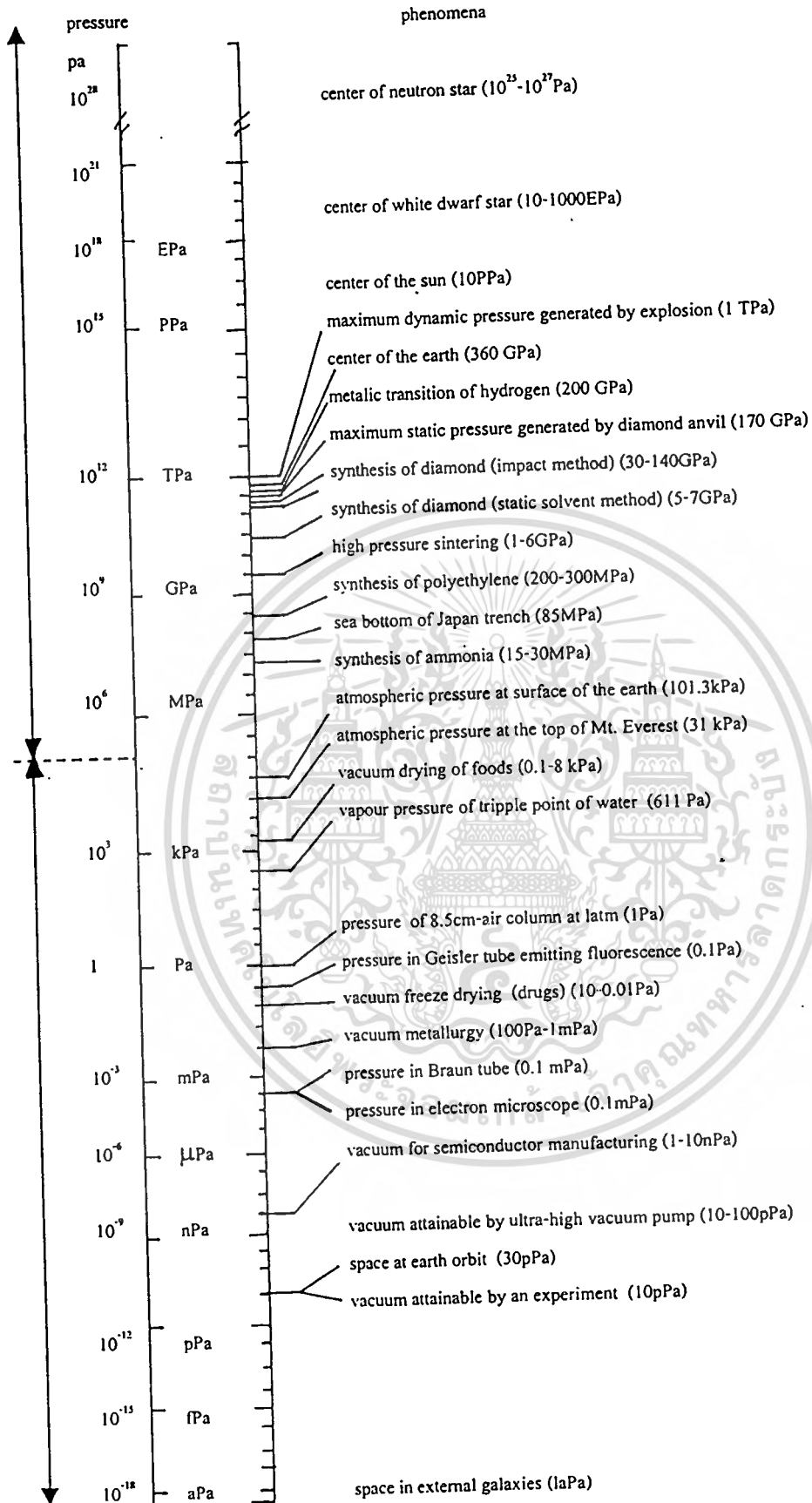
ตารางที่ ง.1 (ต่อ) แสดงค่าแฟกเตอร์ในการแปลงหน่วยทางด้านความดัน

Pressure Unit Value	millibars	mm mercury 0°C	in mercury 0°C	gram/cm ²	lb/in ²	lb/ft ²	cm water 20°C	in water 20°C
1 atmosphere =	1013.250	760.000	29.9213	1033.227	14.69595	2116.22	1035.08	407.513
1 millibar (mb) =	1	0.75006	0.029530	1.0197	0.014504	2.0885	1.0215	0.40218
1 mm Hg =	1.3332	1	0.03937	1.3595	0.019337	2.7845	1.3619	0.53620
1 in Hg =	33.864	25.400	1	34.531	0.49115	70.726	34.573	13.619
1 gram/cm ² =	0.98067	0.73556	0.028959	1	0.014223	2.0482	1.0018	0.39441
1 lb/in ² (psi) =	68.9476	51.715	2.0360	70.307	1	144	70.433	27.730
1 lb/ft ² =	0.47880	0.35913	0.014139	0.48824	0.0069444	1	0.48912	0.19257
1 cm water 20°C	0.97891	0.73424	0.028907	0.99821	0.014198	2.0444	1	0.3937
1 in water 20°C	2.4864	1.8650	0.73424	2.5354	0.036063	5.1930	2.5400	1
1 atmosphere = 10332.3 kg/m ² = 1.03323 kg/cm ²								
1 bar = 1000 millibars = 10 ⁵ dynes/cm ²								
1 inch = 2.54 cm (old value = 2.54000508 cm; 2 parts per million greater)								
1 pound = 0.45359237 kg (old value = 0.45359243 kg; 2 parts per 15 million greater)								
Density of water at 20°C = 0.998207 grams/cm ³								



ภาคผนวก จ
แสดงค่าความดันต่างๆ ในธรรมชาติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ จ.1 แสดงค่าความดันต่างๆ ในธรรมชาติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ฉ.1 แสดงค่าความหนาแน่นของปรอทที่อุณหภูมิต่างๆ

°C	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	1.0000 0000	0.9998 1859	0.9996 3722	0.9994 5591	0.9992 7465	0.9990 0344	0.9989 1220	.9987 3118	0.9985 5012	0.9983 6911
10	0.9981 8816	.9980 0725	.9978 2639	.9976 4559	.9974 6483	.9972 8412	.9971 0346	.9969 2285	.9967 4228	.9965 6177
20	.9963 8130	.9962 0088	.9960 2051	.9958 4019	.9956 5991	.9954 7968	.9952 9950	.9951 1936	.9949 3027	.9947 5923
30	.9945 7923	.9943 9928	.9942 1938	.9940 3952	.9938 5970	.9936 7993	.9935 0021	.9933 2053	.9931 4089	.9929 6130
40	.9927 8178	.9926 0225	.9924 2279	.9922 4337	.9920 6400	.9918 8467	.9917 0538	.9915 2614	.9913 4694	.9911 6777
50	.9909 8866	.9908 0958	.9906 3054	.9904 5155	.9902 7260	.9900 9369	.9899 1482	.9897 3508	.9895 5719	.9893 7844

ตารางที่ ฉ.1 แสดงค่าความหนาแน่นของปรอทที่อุณหภูมิต่างๆ เพิ่มเติม

Temperature		Density g/cm ³	Temperature		Density g/cm ³
°C	°F		°C	°F	
0	32.00	13.5950 889	30	86.00	13.5213 930
1	33.80	13.5926 226	31	87.80	13.5189 466
2	35.60	13.5901 569	32	89.60	13.5165 009
3	37.40	13.5876 919	33	91.40	13.5140 556
4	39.20	13.5852 277	34	93.20	13.5116 110
5	41.00	13.5827 641	35	95.00	13.5091 670
6	42.80	13.5803 014	36	96.80	13.5067 237
7	44.60	13.5778 392	37	98.60	13.5042 809
8	46.40	13.5753 777	38	100.40	13.5018 387
9	48.20	13.5729 168	39	102.20	13.4993 971
10	50.00	13.5704 568	40	104.00	13.4969 561
11	51.80	13.5679 973	41	105.80	13.4945 158
12	53.60	13.5655 385	42	107.60	13.4920 761
13	55.40	13.5630 805	43	109.40	13.4896 368
14	57.20	13.5606 230	44	111.20	13.4871 983
15	59.00	13.5581 663	45	113.00	13.4847 603
16	60.80	13.5557 102	46	114.80	13.4823 228
17	62.60	13.5532 548	47	116.60	13.4798 860
18	64.40	13.5507 999	48	118.40	13.4774 498
19	66.20	13.5483 459	49	120.20	13.4750 139
20	68.00	13.5458 924	50	122.00	13.4725 789
21	69.80	13.5434 395	51	123.80	13.4701 443
22	71.60	13.5409 874	52	125.60	13.4677 103
23	73.40	13.5385 359	53	127.40	13.4652 769
24	75.20	13.5360 850	54	129.20	13.4628 440
25	77.00	13.5336 347	55	131.00	13.4604 117
26	78.80	13.5311 852	56	132.80	13.4579 800
27	80.60	13.5287 362	57	134.60	13.4555 486
28	82.40	13.5262 878	58	136.40	13.4531 180
29	84.20	13.5238 402	59	138.20	13.4506 878

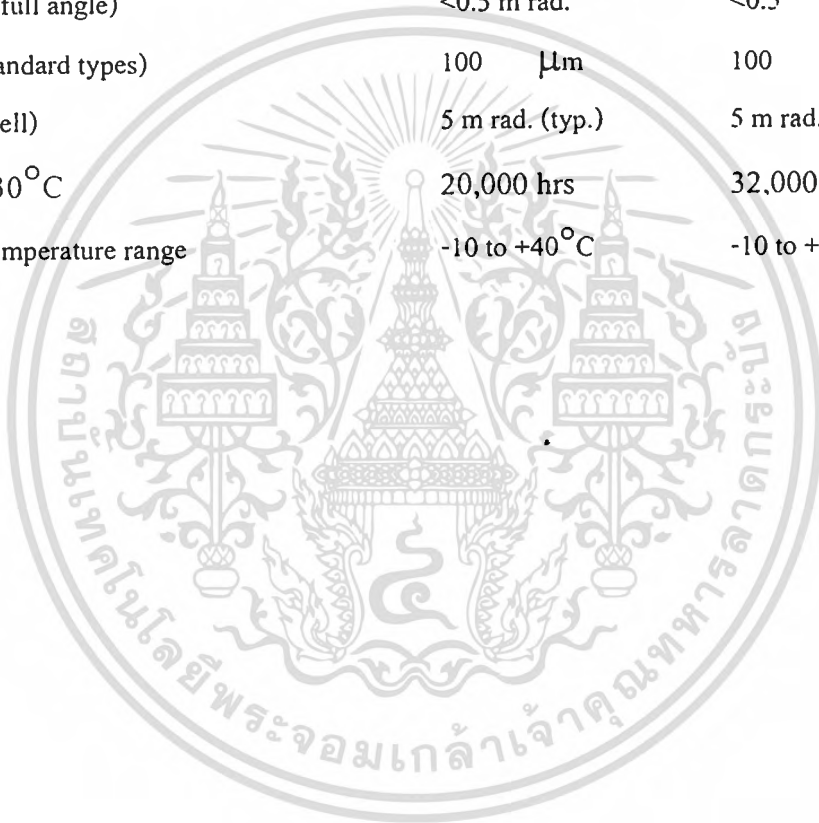
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ช
ข้อกำหนดทางเทคนิคของไดโอดเลเซอร์



Technical Specification

	Visible	Infrared
	633 nm	785 nm
output power (max.)	3 mW	3 mW
wavelength range (min. to max.)	620-680 nm	775-795 nm
(typ.)	633 nm	785 nm
supply voltage	-8 to -12 V	-8 to -12 V
supply current	25-50 mA	25-50 mA
divergence (full angle)	<0.5 m rad.	<0.5 m rad.
spot size (standard types)	100 μm	100 μm
case (front cell)	5 m rad. (typ.)	5 m rad. (typ.)
MTTF @ 30°C	20,000 hrs	32,000 hrs
Operation temperature range	-10 to +40°C	-10 to +50°C



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก ข
ข้อมูลจำเพาะของพินไฟโตไดโอดรุ่น BPW21

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

program for_detect_h;
uses crt,dos;
var
  h,m,sec,houn,comp,choun :word;
  c      :longint;
  i,j,ch,pcount :integer;
  clock,n      :integer;
  lenght      :double;
  pressure     :double;
  s           :string[20];
  chr,exit    :char;
const
  bkcolor=green;

procedure count;
begin
  textcolor(white);
  textbackground(black);
  gotoxy(1,5);
  lowvideo;
  writeln("Enter to start measuring And");writeln;
  writeln('Apply pressure to move the lenght under test');write
In;
  highvideo;
  writeln('Press Enter agian to get reading ');
  gotoxy(70,1);
  highvideo;
  textcolor(red+blink);
  writeln('Running');
  gettime(h,m,sec,houn);
  settime(h,m,00,houn);
  gettime(h,m,sec,houn);
  if sec>=59 then comp:=sec-59 {if count 5 sec (60-5)=55 }
  else comp:=sec+1;
  choun:=houn;
  normvideo;
  gotoxy(1,1);write(c);
  repeat
    i:=port[$300];
    if (i<>n) and (i<>j) then
      begin
        clock:=1;
        j:=i;
      end else
        begin
          clock:=0;
          j:=i;
        end;
    if clock=1 then

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

begin
  gotoxy(1,1);
  write(c); {display counter}
  c:=c+1;
  end; {if j change to up clock}
until keypressed;
readln;
end;

{=====main=====}
begin
  clrscr;
  port[$303]:= $9B; {9B = input all, 80 output all}
  repeat
  c:=0;ch:=0;
  clock:=0;
  j:=port[$300];
  n:=j;
  highvideo;
  gotoxy(70,1);
  textcolor(red+blink);
  writeln('Ready');
  gotoxy(30,3);
  normvideo;
  textcolor(yellow);
  textbackground(green);
  writeln('Interferometric Distance');writeln;
  normvideo;
  textcolor(white);
  writeln('Enter to start measuring And');writeln;
  writeln('Apply pressure to move the lenght under test');write
ln;
  lowvideo;
  writeln('Press Enter again to get reading');writeln;
  gotoxy(27,25);
  textcolor(5);
  textbackground(white);
  write('Primary pressure standard-Rungsiya');
  gotoxy(1,2);
  readln;
  count;
  lenght:=(c*0.000633)/2;
  pressure:=13500.00000*9.78303959*lenght;

  gotoxy(1,20);
  textcolor(white);
  lowvideo;
  write('The lenght under test is :');
  highvideo;

```

```

writeln(lenght:13:3,' mm. ');
gotoxy(1,21);
textcolor(white);
lowvideo;
write('Pressure : ');
highvideo;
writeln(pressure:13:3,' Pa');

textcolor(red+blink);
gotoxy(70,1);writeln('Finished');
textcolor(2);
gotoxy(31,22);
writeln('Press Enter to Again');
gotoxy(31,23);
write('Press Esc to Exit');
gotoxy(1,25);
textcolor(white);
lowvideo;
exit:=readkey;
gotoxy(1,1);clreol;
gotoxy(1,20);clreol;
gotoxy(1,22);clreol;
gotoxy(1,23);clreol;
until exit=#27;
write(c);
end.

```

0





เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน

วิทยานิพนธ์เล่มนี้จัดทำโดย นางสาวรังสิยา วงษ์สุติน เกิดเมื่อวันที่ 13 กันยายน 2509 ที่อำเภอ พระนครศรีอยุธยา จังหวัดพระนครศรีอยุธยา สำเร็จการศึกษาชั้นมัธยมจากโรงเรียน จอมสุรางค์อุปถัมภ์ จังหวัดพระนครศรีอยุธยา และการศึกษาในระดับปริญญาตรี วิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาฟิสิกส์ จากมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ บางแสน เมื่อปีการศึกษา 2531 ประวัติการทำงาน หลังจบการศึกษาทำงานที่ กระทรวงวิทยาศาสตร์เทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม กรมวิทยาศาสตร์บริการ กองฟิสิกส์และวิศวกรรม ฝ่ายฟิสิกส์ ในตำแหน่งนักวิทยาศาสตร์ 3 จนถึง นักวิทยาศาสตร์ 5 ได้มาทำงานที่สถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติ ห้องปฏิบัติการมวลและเชิงกล ในตำแหน่ง นักมาตรวิทยา จนกระทั่งถึงปัจจุบัน และในปี 2535-2536 เป็นอาจารย์พิเศษในห้องปฏิบัติการฟิสิกส์1 คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง โดยเข้าศึกษาต่อระดับปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาฟิสิกส์ประยุกต์ ในปี การการศึกษา 2535 ที่สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้