

การศึกษาอุปกรณ์หล่อเย็นแบบหมุนวน

EXPERIMENTAL STUDY OF A VORTEX COOLING DEVICE



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2543

ISBN 974-622-776-9

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การศึกษาอุปกรณ์หล่อเย็นแบบหมุนวน

EXPERIMENTAL STUDY OF A VORTEX COOLING DEVICE



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2543

เลขหม.....

เลขทะเบียน..... 36022

วัน, เดือน, ปี..... 5 ก.ค. 2543

ISBN 974-622-776-9

**EXPERIMENTAL STUDY OF A VORTEX COOLING DEVICE**



**A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT  
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF  
MASTER OF ENGINEERING IN MECHANICAL ENGINEERING  
SCHOOL OF GRADUATE STUDIES**

**KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG**

เอกสารนี้เป็นเอกสารผลงานวิจัยสำหรับบริการวิชาการเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และเผยแพร่อย่างอื่นถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**2000**

**ISBN 974-622-776-9**



**COPYRIGHT 2000**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
**SCHOOL OF GRADUATE STUDIES**

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้  
**KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG**

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การศึกษาเชิงทดลองของอุปกรณ์หล่อเย็นแบบหมุนวน
นักศึกษา	นายปริญญา ปรีชาปัญญาวงศ์
รหัสประจำตัว	36061079
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมเครื่องกล
พ.ศ.	2543
อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์	ผศ.ดร.พงษ์เจต พรหมวงศ์
อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ร่วม	รศ.สมชัย นรเศรษฐ์โสภณ

### บทคัดย่อ

การศึกษาถึงความแตกต่างของอุณหภูมิภายในท่ออุปกรณ์หล่อเย็นแบบหมุนวนแบบไหลตามกันซึ่งมีอิทธิพลมาจากช่องกระจายอากาศ ที่ติดตั้งที่ปลายทางออกของท่ออุปกรณ์หล่อเย็นแบบหมุนวน และภายในท่ออุปกรณ์หล่อเย็นแบบหมุนวน ที่มีลักษณะการขยายออกจากแกนกลางท่อ โดยมีความเอียงมุมของท่ออุปกรณ์หล่อเย็นแบบหมุนวนเท่ากับ 2, 4 และ 6 องศา ตลอดจนความยาวท่อที่ทางออก ซึ่งได้ทำการทดลองปรับช่องกระจายอากาศที่ปลายของท่อวอร์เท็กซ์ ในช่องกระจายอากาศ (Gap) = 0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5 และ 3.0 mm จากการทดลองพบว่าที่ท่ออุปกรณ์หล่อเย็นแบบหมุนวนที่มีความเอียงมุม 6 องศา ความดันที่ทางเข้าท่ออุปกรณ์หล่อเย็นแบบหมุนวน = 4.5 bar ช่องกระจายอากาศ (Gap) = 3.0 mm จะมีความแตกต่างอุณหภูมิสูงสุดโดยที่ตำแหน่ง  $x/d = 0.42$  จะมีค่าการลดลงของอุณหภูมิสูงสุดเท่ากับ  $19.7^{\circ}\text{C}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

<b>Thesis Title</b>	Experimental Study of a Vortex Cooling Device
<b>Student</b>	Mr. Parinya Pariyapanjang
<b>Student ID.</b>	36061079
<b>Degree</b>	Master of engineering
<b>Programme</b>	Mechanical Engineering
<b>Year</b>	2000
<b>Thesis Advisor</b>	Assistant Professor Dr.Pongjet Promvonge
<b>Thesis Co-Advisor</b>	Associate Professor Somchai Norasethasopon

### ABSTRACT

The paper presents temperature distributions in a uniflow vortex-tube. The device used in this study is a uniflow vortex tube type with a diffusing plate at the exit. The vortex tube shape is gradually expanded with a maximum of 6-degree along its length to the exit. Effects of gaps between plates degree of the tube expansion and the inlet pressure and temperature drop inside the tubes are examined. The experimental results showed that the vortex tube with maximum degree expansion of 6-degree ,4.5 bar and a 3.0 mm gap in this case, yields a maximum temperature drop to 19.7 °C inside the tube.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## กิตติกรรมประกาศ

การทำวิจัยในวิทยานิพนธ์นี้ ข้าพเจ้าต้องขอขอบคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พงษ์เจต พรหมวงศ์ ที่ได้รับความเมตตาประสิทธิประสาทวิชาความรู้พร้อมทั้งเป็นที่ปรึกษาแนะนำข้าพเจ้าตลอดระยะเวลาเสมือนผู้ชุบชีวิต ให้ต่อสู้จนสามารถทำวิทยานิพนธ์สำเร็จ ซึ่งข้าพเจ้าจะจดจำความดีของท่านอาจารย์จนชีวิตจะหาไม่

ข้าพเจ้าขอขอบคุณนักศึกษาหลายรุ่นของภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังที่มีส่วนร่วมในผลงานชุดนี้, ขอขอบคุณบริษัทไทยพีเอ็น จำกัด, ขอขอบคุณสมิท เอี่ยมสะอาด วิศวกร เป็นอย่างสูงที่ให้คำแนะนำเรื่องข้อมูลและช่วยเหลือ งานวิจัยตลอดมาและขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร

ข้าพเจ้าขอขอบคุณ คุณจตุพร อินทรโสภา, ตลอดจนเพื่อนๆ ที่ให้การสนับสนุนในการช่วยเหลือ การวิจัยนี้ตลอดมา

สุดท้ายนี้ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณบิดามารดา ที่ ที่สนับสนุนส่งเสริมพร้อมเป็นกำลังใจในการทำวิจัยครั้งนี้ของข้าพเจ้า ให้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

นายปริญญา ปริญญาพงศ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VIII
สารบัญรูป.....	X
สัญลักษณ์.....	XIV
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	1
1.3 สมมุติฐานของการศึกษา.....	2
1.4 ทฤษฎีที่ใช้ในการวิจัย.....	2
1.5 ขอบเขตของการทดสอบ.....	2
1.6 ขั้นตอนของการศึกษา.....	3
บทที่ 2 ทฤษฎีพื้นฐาน.....	4
2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับอุปกรณ์หล่อเย็นแบบหมุนวนหรือออร์เทกซ์.....	4
2.2 หลักการทำงานของอุปกรณ์ทำความเย็นแบบหมุนวน.....	22
2.3 ประสิทธิภาพทำความเย็น (Cooling Efficiency).....	24
บทที่ 3 การสร้างอุปกรณ์ทดลอง.....	25
3.1 การคำนวณแนวทางที่ใช้ในการออกแบบ.....	25
3.1.1 การออกแบบเส้นผ่านศูนย์กลางหัวฉีด.....	25
3.1.2 การออกแบบเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อส่วนที่เล็กที่สุด.....	25
3.1.3 การออกแบบความยาวของท่อ.....	26
3.1.4 การออกแบบขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของตัวแพร่กระจายอากาศ (Diffuser) และตัวปิดอากาศ (End Plate).....	26
3.1.5 การออกแบบ Vortex Chamber.....	27

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.1.6 การออกแบบแรงดันลม.....	27
3.1.7 การออกแบบช่องกระจายอากาศ (Gap).....	27
3.1.8 การออกแบบตำแหน่งการวัดค่าอุณหภูมิ.....	27
3.1.9 ชุดข้อมูลสำหรับท่อออร์เทกซ์แบบไหลตามกัน.....	27
3.1.10 ส่วนประกอบอุปกรณ์ทำความเย็นแบบหมุนวนแบบไหลตามกัน.....	29
3.2 การเลือกอุปกรณ์ประกอบการทดลอง.....	39
3.2.1 เครื่องอัดลม (Air Compressor).....	39
3.2.1.1 หลักการของเครื่องอัดลม.....	39
3.2.1.2 การจำแนกประเภทของเครื่องอัดลม.....	46
3.2.1.3 ระบบการส่งจ่ายลมอัด (Compressed Air System).....	51
3.2.1.4 ข้อเสนอแนะในการติดตั้งเครื่องอัดลม.....	53
3.2.1.5 สภาพของการดูดอากาศ.....	54
3.2.1.6 ฐาน.....	57
3.2.1.7 การติดตั้ง.....	58
3.2.1.8 ระบบท่อ.....	60
3.2.1.9 ท่อจ่ายลม.....	60
3.2.1.10 ท่อลดอัตราการอัด (Unloading Pipe).....	65
3.2.1.11 ระบบท่อหล่อเย็นและระบบท่ออื่น.....	66
3.2.1.12 ระบบสายไฟฟ้า.....	67
3.2.1.13 การทดสอบในที่ใช้งาน.....	67
3.2.1.14 การทำงานประจำวัน.....	71
3.2.1.15 เครื่องอัดที่ไม่ได้ใช้งานเป็นเวลานาน.....	71
3.2.1.16 การซ่อมบำรุงรักษาและตรวจ.....	71
3.2.1.17 การตรวจทุกวัน.....	72
3.2.1.18 การตรวจประจำ.....	72
3.2.1.19 กระบวนการตรวจ.....	73

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ในการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.2.2 อุณหภูมิและเครื่องมือวัดอุณหภูมิ.....	75
3.2.2.1 อุณหภูมิและมาตราวัดอุณหภูมิ.....	75
3.2.2.2 อุณหภูมิอ้างอิงมาตรฐาน (Reference Temperatures).....	76
3.2.2.3 หลักการวัดอุณหภูมิ.....	77
3.2.2.4 เทอร์โมคัปเปิล (Thermocouples).....	78
3.2.2.5 เทอร์โมคัปเปิลแบบ S (Type S Platinum 10% Rhodium V.S. Platinum).....	80
3.2.2.6 เทอร์โมคัปเปิลแบบ R (Type R Platinum 13% Rhodium).....	81
3.2.2.7 เทอร์โมคัปเปิลแบบ B (Type B Platinum 30 % Rhodium/Platinum 6% Rhodium).....	81
3.2.2.8 เทอร์โมคัปเปิลแบบ J (Type J V.S. Constantan).....	82
3.2.2.9 เทอร์โมคัปเปิลแบบ K (Type K Chromel V.S. Aiumel).....	83
3.2.2.10 เทอร์โมคัปเปิลแบบ T (Type T Copper V.S. Constantan).....	84
3.2.2.11 เทอร์โมคัปเปิลแบบ E (Type E Chonmel V.S.Constantan).....	85
3.2.2.12 เครื่องมือวัด Testo 400.....	85
บทที่ 4 การทดลองและผลการทดลอง.....	89
4.1 อุปกรณ์การทดลอง.....	89
4.1.1 ชุดอุปกรณ์ทำความเย็นแบบหมุนวน.....	89
4.1.2 อุปกรณ์แหล่งจ่ายอากาศ.....	89
4.1.3 อุปกรณ์อื่นๆ (Accessory).....	89
4.2 วิธีการทดลอง.....	89
4.3 ผลการทดลอง.....	91
4.3.1 อิทธิพลช่องกระจายอากาศ (Gap) ที่มีผลต่อการลดลงของอุณหภูมิ.....	91
4.3.2 อิทธิพลของความดันทางเข้าที่มีผลต่อการลดลงของอุณหภูมิ.....	95
4.3.3 อิทธิพลของความเยี่ยงนมท้อ มีผลต่อการลดลงของอุณหภูมิ.....	99
4.3.4 อิทธิพลของตำแหน่งการวัด ณ. T2,T6 และT10 กับช่องกระจายอากาศ ที่มีผลการนำไปใช้ที่มีต่อการลดลงของอุณหภูมิ.....	103

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.3.5 อิทธิพลของตำแหน่งการวัด ณ. T1-T10 กับช่องกระจายอากาศ ที่มีต่อการลดลงของอุณหภูมิ.....	107
บทที่ 5 บทสรุป.....	111
5.1 สรุปผลการทดลอง.....	111
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	112
5.3 ประโยชน์ที่ได้รับ.....	112
5.4 แนวทางการวิจัยในอนาคต.....	112
บรรณานุกรม.....	114
ภาคผนวก ส่วน ก แสดงชิ้นส่วนอุปกรณ์การหล่อเย็นแบบหมุนวน.....	116
ภาคผนวก ส่วน ข ตารางแสดงผลการทดลองอุปกรณ์การหล่อเย็นแบบหมุนวน.....	123
ประวัติผู้เขียน.....	141

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
3.1 ข้อมูลสำหรับท่อวอร์เทกซ์แบบไหลตามกัน.....	28
3.2 พลังงานที่เก็บไว้ได้โดยการอัด.....	42
3.3 ข้อมูลทางด้านเทคนิคและการใช้งานของเครื่องอัดลม.....	48
3.4 การเลือกตำแหน่งเพื่อการติดตั้งเครื่องอัดและข้อควรระวัง.....	54
3.5 ข้อควรระวังในโรงงานและการติดตั้ง .....	58
3.6 ข้อควรระวังในการติดตั้งท่อจ่ายลม.....	61
3.7 ข้อควรระวังในการติดตั้งระบบท่อลดการอัด.....	65
3.8 ข้อควรระวังสำหรับการออกแบบและต่อท่อน้ำเย็นและระบบท่ออื่น.....	66
3.9 การตรวจหาจุดที่เป็นปัญหาและวิธีการแก้ไขเครื่องอัดขนาดเล็ก.....	68
3.10 ตารางของการตรวจประจำวัน.....	72
ก. 1 Part Vortex Cooling Test.....	116
ข.1 ผลการทดลองความเอียงมุมท่อ 2 องศา, ความดัน 2 bar, $T_{01} = 29^{\circ}\text{C}$ .....	123
ข.2 ผลการทดลองความเอียงมุมท่อ 2 องศา, ความดัน 2.5 bar, $T_{01} = 29^{\circ}\text{C}$ .....	124
ข.3 ผลการทดลองความเอียงมุมท่อ 2 องศา, ความดัน 3.0 bar, $T_{01} = 29^{\circ}\text{C}$ .....	125
ข.4 ผลการทดลองความเอียงมุมท่อ 2 องศา, ความดัน 3.5 bar, $T_{01} = 29^{\circ}\text{C}$ .....	126
ข.5 ผลการทดลองความเอียงมุมท่อ 2 องศา, ความดัน 4.0 bar, $T_{01} = 29^{\circ}\text{C}$ .....	127
ข.6 ผลการทดลองความเอียงมุมท่อ 2 องศา, ความดัน 4.5 bar, $T_{01} = 29^{\circ}\text{C}$ .....	128
ข.7 ผลการทดลองความเอียงมุมท่อ 4 องศา, ความดัน 2 bar, $T_{01} = 29^{\circ}\text{C}$ .....	129
ข.8 ผลการทดลองความเอียงมุมท่อ 4 องศา, ความดัน 2.5 bar, $T_{01} = 29^{\circ}\text{C}$ .....	130
ข.9 ผลการทดลองความเอียงมุมท่อ 4 องศา, ความดัน 3.0 bar, $T_{01} = 29^{\circ}\text{C}$ .....	131
ข.10 ผลการทดลองความเอียงมุมท่อ 4 องศา, ความดัน 3.5 bar, $T_{01} = 29^{\circ}\text{C}$ .....	132
ข.11 ผลการทดลองความเอียงมุมท่อ 4 องศา, ความดัน 4.0 bar, $T_{01} = 29^{\circ}\text{C}$ .....	133
ข.12 ผลการทดลองความเอียงมุมท่อ 4 องศา, ความดัน 4.5 bar, $T_{01} = 29^{\circ}\text{C}$ .....	134
ข.13 ผลการทดลองความเอียงมุมท่อ 6 องศา, ความดัน 2 bar, $T_{01} = 29^{\circ}\text{C}$ .....	135
ข.14 ผลการทดลองความเอียงมุมท่อ 6 องศา, ความดัน 2.5 bar, $T_{01} = 29^{\circ}\text{C}$ .....	136
ข.15 ผลการทดลองความเอียงมุมท่อ 6 องศา, ความดัน 3.0 bar, $T_{01} = 29^{\circ}\text{C}$ .....	137
ข.16 ผลการทดลองความเอียงมุมท่อ 6 องศา, ความดัน 3.5 bar, $T_{01} = 29^{\circ}\text{C}$ .....	138

## สารบัญตาราง(ต่อ)

ตารางที่	หน้า
ข.17 ผลการทดลองความเอียงมุมท่อ 6 องศา, ความดัน 4.0 bar, $T_{01} = 29 \text{ }^{\circ}\text{C}$ .....	139
ข.18 ผลการทดลองความเอียงมุมท่อ 6 องศา, ความดัน 4.5 bar, $T_{01} = 29 \text{ }^{\circ}\text{C}$ .....	140



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 แสดงอุปกรณ์การทดลอง Hilsch.....	5
2.2 แสดงอากาศที่ไหลผ่านเข้าหัวฉีดของอุปกรณ์การทดลอง.....	5
2.3 การไหลสวนทางกันและตามกันของ Martynovskii และ Alekseev.....	6
2.4 แสดงส่วนหัววอร์เท็กซ์ ที่มีขนาดต่างๆของ Martynovskii และ Alekseev.....	6
2.5 อุปกรณ์การทดลองของ Martynovskii และ Alekseev.....	7
2.6 แสดงท่อวอร์เท็กซ์ ที่มีขนาด 9–16 mm ของ Martynovskii และ Alekseev.....	7
2.7 แสดงการเปรียบเทียบการลดลงของ Vortex Cooling เปรียบเทียบกับ Hilsch Tube.....	9
2.8 เครื่องมือทดสอบ.....	10
2.9 ผลของการวัดตัวแพร่กระจายขนาดที่ให้ผลดีที่สุด (Diffuser Optimization).....	11
2.10 ผลของการทดลองกรณีเปลี่ยน Pipe Length.....	11
2.11 การทดสอบที่มีการเปลี่ยนรูปแบบของทางเข้า.....	12
2.12 แสดงผลของปัจจัยที่มีผลต่ออุณหภูมิ ณ ตำแหน่งแกน.....	12
2.13 แสดงถึงการแพร่กระจายของการลดลงของอุณหภูมิในแนวรัศมี.....	13
2.14 แสดงให้เห็นถึงการลดลงและคงที่ของความดัน ที่กระจายในแนวรัศมี.....	13
2.15 แสดงค่าการลดลงของอุณหภูมิจะเพิ่มขึ้น เมื่ออัตราการไหลของมวลเพิ่มขึ้น.....	14
2.16 อุณหภูมิและการแพร่กระจายความดันในแนวแกน.....	15
2.17 เลข Stanton ของ Heat Flux.....	16
2.18 แสดงประสิทธิภาพการทำความเย็นและอุณหภูมิของพื้นผิวของตัวทำความร้อน.....	16
2.19 การลดลงของอุณหภูมิจนกับอัตราส่วนความดัน โดยรวมสำหรับหลายรูปแบบ.....	17
2.20 แสดงอุปกรณ์การทดลองของ Hartnett และ Eckert.....	18
2.21 แสดงอุปกรณ์การทดลองของ Stephan และคณะ.....	19
2.22 ตำแหน่งการวัดของท่ออุปกรณ์.....	22
2.23 อากาศที่ไหลผ่านเข้าหัวฉีดสู่ท่อวอร์เท็กซ์.....	23
2.24 พื้นฐานการทำงานของท่อวอร์เท็กซ์แบบการไหลสวนทางกัน.....	24
2.25 พื้นฐานการทำงานของท่อวอร์เท็กซ์แบบการไหลตามทางกัน.....	24
3.1 แบบชุดทดสอบอุปกรณ์ทำความเย็นแบบหมุนวนแบบไหลตามกัน.....	29

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น มิอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์อื่นใด

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.2 ท่ออุปกรณ์หล่อเย็น.....	30
3.3 ตัวปิดช่องวัดอุณหภูมิของท่อออร์เทกซ์.....	31
3.4 หัวฉีดท่ออุปกรณ์หล่อเย็นแบบหมุนวน.....	32
3.5 ท่ออุปกรณ์หล่อเย็นแบบหมุนวนที่มีความเอียงมุมขนาดต่างๆ.....	33
3.6 แท่นวางท่ออุปกรณ์หล่อเย็นแบบหมุนวน ขนาด 150x150x120 mm.....	34
3.7 แหวนกั้นช่องกระจายอากาศของอุปกรณ์หล่อเย็นแบบหมุนวน.....	35
3.8 ตัวแพร่กระจายอากาศ (Diffuser) ขนาด 250x9 mm ของอุปกรณ์หล่อเย็นแบบหมุนวน.....	36
3.9 ตัวปิดกระจายอากาศ (End Plate) ขนาด 250x3 mm ของอุปกรณ์หล่อเย็นแบบหมุนวน.....	37
3.10 ชุดทดลองอุปกรณ์หล่อเย็นแบบหมุนวน.....	38
3.11 การอัดของแข็ง.....	39
3.12 พลังงานเนื่องจากยืดหยุ่น.....	40
3.13 การอัดของไหล.....	41
3.14 เครื่องสูบยางจักรยาน.....	43
3.15 หลักการทำงานของเครื่องอัดลมซึ่งคล้ายกับของเครื่องสูบยาง.....	43
3.16 ส่วนประกอบของเครื่องอัดลม.....	44
3.17 มีการอัดลมภายใน (ชนิดแผ่นกวาดหรือเกลียว).....	44
3.18 ไม่มีการอัดลมภายใน (ชนิด Roots).....	45
3.19 การจำแนกประเภทของเครื่องอัดลม.....	46
3.20 แสดงเครื่องอัดลมชนิดต่างๆ และการเลือก.....	47
3.21 เครื่องอัดลมแบบลูกสูบ.....	49
3.22 เครื่องอัดลมแบบโรตารีสกู.....	49
3.23 เครื่องอัดลมแบบหอยโข่ง.....	50
3.24 เครื่องอัดลมแบบแรงเหวี่ยงขนาดใหญ่.....	50
3.25 ไคอะแกรมการติดตั้งเครื่องอัดลมและส่วนประกอบ.....	50
3.26 รายละเอียดการติดตั้งถังเก็บลม.....	52
3.27 รายละเอียดของเครื่องแยกความชื้น (Water Separator).....	53
3.28 ฐานของเครื่องอัดอากาศ.....	57
3.29 เครื่องอัดอากาศที่นำมาใช้ในการทดลอง.....	74

## สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.30 แสดงการเปรียบเทียบอุณหภูมิทั้ง 3 มาตรา.....	76
3.31 (a) (b) แสดงวงจรการทดลองของซีเบ็ค.....	78
3.32 แสดงวงจรการทดลองของเพลเทียร์.....	79
3.33 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของแรงเคลื่อนไฟฟ้ากับอุณหภูมิของเทอร์โมคัปเปิลแบบ S.....	80
3.34 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของแรงเคลื่อนไฟฟ้ากับอุณหภูมิของเทอร์โมคัปเปิลแบบ R.....	81
3.35 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของแรงเคลื่อนไฟฟ้ากับอุณหภูมิของเทอร์โมคัปเปิลแบบ B.....	82
3.36 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของแรงเคลื่อนไฟฟ้ากับอุณหภูมิของเทอร์โมคัปเปิลแบบ J.....	83
3.37 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของแรงเคลื่อนไฟฟ้ากับอุณหภูมิของเทอร์โมคัปเปิลแบบ K.....	83
3.38 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของแรงเคลื่อนไฟฟ้ากับอุณหภูมิของเทอร์โมคัปเปิลแบบ T.....	84
3.39 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของแรงเคลื่อนไฟฟ้ากับอุณหภูมิของเทอร์โมคัปเปิลแบบ E.....	85
3.40 ลักษณะของเครื่องมือวัด Testo 400.....	87
3.41 ลักษณะของหัววัด Testo 400.....	88
4.1 อิทธิพลช่องกระจายอากาศ (Gap) ขนาดต่างๆ มีผลต่อการลดลงของอุณหภูมิ ที่ความดัน = 2.0 bar มีความชื้นมมที่ = 6 องศา.....	92
4.2 อิทธิพลช่องกระจายอากาศ (Gap) ขนาดต่างๆ มีผลต่อการลดลงของอุณหภูมิ ที่ความดัน = 3.0 bar มีความชื้นมมที่ = 6 องศา.....	93
4.3 อิทธิพลช่องกระจายอากาศ (Gap) ขนาดต่างๆ มีผลต่อการลดลงของอุณหภูมิ ที่ความดัน = 3.0 bar มีความชื้นมมที่ = 6 องศา.....	94
4.4 อิทธิพลความดันต่างๆ มีผลต่อการลดลงของอุณหภูมิ ที่ช่องกระจายอากาศ (Gap) = 0.5 mm มีความชื้นมมที่ = 6 องศา.....	96
4.5 อิทธิพลความดันต่างๆ มีผลต่อการลดลงของอุณหภูมิ ที่ช่องกระจายอากาศ (Gap) = 1.5 mm มีความชื้นมมที่ = 6 องศา.....	97
4.6 อิทธิพลความดันต่างๆ มีผลต่อการลดลงของอุณหภูมิ ที่ช่องกระจายอากาศ (Gap) = 3.0 mm มีความชื้นมมที่ = 6 องศา.....	98
4.7 อิทธิพลการปรับความชื้นมมที่ที่มีผลต่อการลดลงของอุณหภูมิ ที่ช่องกระจายอากาศ (Gap) = 0.5 bar มีความดัน = 4.5 bar.....	100
4.8 อิทธิพลการปรับความชื้นมมที่ที่มีผลต่อการลดลงของอุณหภูมิ ที่ช่องกระจายอากาศ (Gap) = 2.0 bar มีความดัน = 4.5 bar.....	101

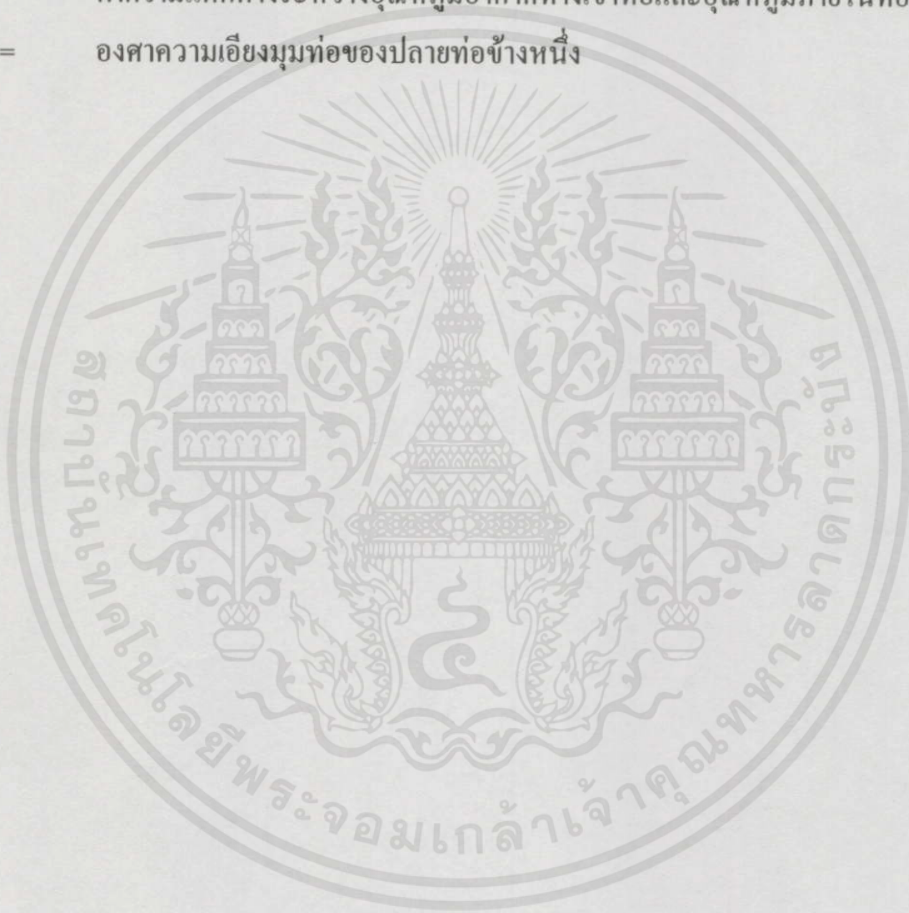
## สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.9 อิทธิพลการปรับความเอียงมุมท่อที่มีผลต่อการลดลงของอุณหภูมิ ที่ช่องกระจายอากาศ (Gap) = 3.0 bar มีความดัน = 4.5 bar.....	102
4.10 อิทธิพลช่องกระจายอากาศ (Gap) ขนาดต่างๆ มีผลต่อการลดลงของอุณหภูมิ ตำแหน่งการวัด T10 ที่ความดัน 4.5 bar ที่ความเอียงมุมท่อ 6 องศา.....	104
4.11 อิทธิพลช่องกระจายอากาศ (Gap) ขนาดต่างๆ มีผลต่อการลดลงของอุณหภูมิ ตำแหน่งการวัด T6 ที่ความดัน 4.5 bar ที่ความเอียงมุมท่อ 6 องศา.....	105
4.12 อิทธิพลช่องกระจายอากาศ (Gap) ขนาดต่างๆ มีผลต่อการลดลงของอุณหภูมิ ตำแหน่งการวัด T2 ที่ความดัน 4.5 bar ที่ความเอียงมุมท่อ 6 องศา.....	106
4.13 อิทธิพลตำแหน่งการวัดต่างๆ มีผลต่อการลดลงของอุณหภูมิ ที่ช่องกระจายอากาศ (Gap) = 1.0 mm มีความดัน = 4.5 bar ที่ความเอียงมุมท่อ =6 องศา.....	108
4.14 อิทธิพลตำแหน่งการวัดต่างๆ มีผลต่อการลดลงของอุณหภูมิ ที่ช่องกระจายอากาศ (Gap) = 2.0 mm มีความดัน = 4.5 bar ที่ความเอียงมุมท่อ =6 องศา.....	109
4.15 อิทธิพลตำแหน่งการวัดต่างๆ มีผลต่อการลดลงของอุณหภูมิ ที่ช่องกระจายอากาศ (Gap) = 3.0 mm มีความดัน = 4.5 bar ที่ความเอียงมุมท่อ =6 องศา.....	110
ก.1 Assembly Vortex Cooling Test.....	117
ก.2 Detail A Vortex Cooling.....	118
ก.3 1. Work Table 2. Stand.....	119
ก.4 Diffuser Plate.....	120
ก.5 Vortex Chamber.....	121
ก.6 1. Bolt 2. End Plate.....	122

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สัญลักษณ์

$x$	=	ระยะขจัดจากผนังปิดปากท่อถึงตำแหน่งที่วัด mm
$d$	=	เส้นผ่านศูนย์กลางของท่อ mm
$L$	=	ความยาวของท่อ mm
$T_{min}$	=	อุณหภูมิภายในท่อออร์เทกซ์ วัดเป็น °C
$T_{01}$	=	อุณหภูมิทางเข้า วัดเป็น °C
$\Delta T$	=	ค่าความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิอากาศทางเข้าท่อและอุณหภูมิภายในท่อ °C
$\theta$	=	องศาความเอียงมุมท่อของปลายท่อข้างหนึ่ง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาความสำคัญของปัญหา

อุปกรณ์หล่อเย็นแบบหมุนวน (Vortex Cooling Device) หรือเรียกสั้นๆว่าทอเวอร์เทกซ์ ใช้หลักการทำให้อากาศถูกอัดตัวไหลผ่านหัวฉีด (Nozzle) เข้าสู่ทอเวอร์เทกซ์ ทำให้เกิดการแยกตัวเป็นอากาศร้อนที่ผนังท่อและอากาศเย็นที่บริเวณกลางทอเวอร์เทกซ์ อากาศเย็นที่ได้นำมาใช้ในการทำความเย็นด้วยอากาศ ถึงแม้ว่าประสิทธิภาพการทำความเย็นด้วยอากาศของทอเวอร์เทกซ์ จะต่ำมากเมื่อเทียบกับระบบการทำความเย็นแบบชนิดอื่น ๆ แต่เป็นเครื่องมือที่ไม่สลับซับซ้อน เป็นระบบทำความเย็น โดยไม่ต้องใช้สารเคมีเป็นสารทำความเย็น ระบบทำความเย็นแบบทอเวอร์เทกซ์จึงมีความปลอดภัยสูง และไม่มีมลพิษต่อสิ่งแวดล้อมจึงเหมาะสมต่อการนำไปใช้งานในบางประเภท เช่น ระบบการทำความเย็นของเครื่องบิน การทำความเย็นบนรถไฟ ทำความเย็นเครื่องตัดโลหะ เป็นต้น

มีผู้พยายามวิเคราะห์ปัญหาของทอเวอร์เทกซ์ โดยพยายามอธิบายด้วยวิธีทางคณิตศาสตร์ แต่ก็ไม่ประสบความสำเร็จนัก เนื่องจากมีข้อจำกัดของสมมติฐานหลายประการ ดังนั้นวิธีที่นิยมในการศึกษาเกี่ยวกับทอเวอร์เทกซ์จะใช้วิธีทดสอบกับชุดทดลอง ในงานวิจัยนี้ จึงได้ทำการศึกษาเชิงทดลองเพื่อศึกษาการกระจายอุณหภูมิภายในทอเวอร์เทกซ์ และทดสอบปัจจัยต่าง ๆ ที่มีผลต่อการลดลงของการทำความเย็นภายในทอเวอร์เทกซ์ ได้แก่ อิทธิพลของความดันอากาศที่ทางเข้า, อิทธิพลขององศาความเอียงมุมของปลายท่อ, อิทธิพลของช่องกระจายอากาศ (Gap) และอิทธิพลของตำแหน่งของการวัด

### 1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา

1.2.1 ออกแบบและสร้างชุดทดลองอุปกรณ์หล่อเย็นแบบหมุนวนไหลตามกัน

1.2.2 ศึกษาปัจจัยต่าง ๆ ที่มีผลต่อการลดลงของอุณหภูมิภายในทอเวอร์เทกซ์ ได้แก่ อิทธิพลของความดันอากาศที่ทางเข้าทอเวอร์เทกซ์, อิทธิพลขององศาความเอียงมุมทอเวอร์เทกซ์, ช่องกระจายอากาศ (Gap) และตำแหน่งของการวัดของทอเวอร์เทกซ์

1.2.3 ศึกษาการกระจายอุณหภูมิภายในทอเวอร์เทกซ์

1.2.4 เขียนกราฟตัวแปรของค่า  $\Delta T$  กับ ตำแหน่ง  $x/D$  ของทอเวอร์เทกซ์ นำมาเปรียบเทียบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 1.3 สมมุติฐานของการศึกษา

1.3.1 ความดันของอากาศที่ทางเข้าท่อวอร์เทกซ์ จะมีอิทธิต่อการลดลงของอุณหภูมิภายในท่อวอร์เทกซ์ เมื่อความดันอากาศมากขึ้นจะทำให้อุณหภูมิลดลงได้มากขึ้นด้วย เนื่องจากอากาศที่เข้ามามีความเร็วเพิ่มมากขึ้น ในการทดสอบจึงเปลี่ยนแปลงความดันอากาศที่ทางเข้าท่อวอร์เทกซ์ ให้มีค่าระหว่าง 2 bar, 2.5 bar, 3.0 bar, 3.5 bar, 4.0 bar และ 4.5 bar ตามลำดับ

1.3.2 การเปลี่ยนขนาดรูปทรงที่มีความเอียงมุมของท่อ จึงน่าจะทำให้มีผลต่อการลดลงของอุณหภูมิในท่อวอร์เทกซ์

1.3.3 การปรับช่องกระจายอากาศ (Gap) จะทำให้อัตราการไหลของอากาศภายในท่อวอร์เทกซ์เปลี่ยนแปลง จึงน่าจะมีผลต่อการลดลงของอุณหภูมิในท่อวอร์เทกซ์

1.3.4 ตำแหน่งที่อุณหภูมิภายในท่อวอร์เทกซ์ จะมีอากาศเย็นลดลงอุณหภูมิมากที่สุดน่าจะ เป็นตำแหน่งที่ใกล้กับบริเวณทางเข้าของอากาศหรือใกล้หัวฉีดของท่อวอร์เทกซ์ และควรจะเป็นตามแนวแกนกึ่งกลางท่อวอร์เทกซ์

1.3.5 จากการทดลองการลดลงของอุณหภูมิ ณ ตำแหน่งต่างๆ เราสามารถนำข้อมูลมาเขียนกราฟเปรียบเทียบหา  $\Delta T$  กับ ตำแหน่ง  $x/D$  ของท่อวอร์เทกซ์

### 1.4 ทฤษฎีที่ใช้ในการวิจัย

1.4.1 ใช้เครื่องต้นแบบของ Thomas และ Raymond [6] ในการออกแบบขนาดของชุดทดสอบท่ออุปกรณ์หล่อเย็นแบบหมุนวนหรือท่อวอร์เทกซ์

1.4.2 ใช้ทฤษฎีของ Ranque [1] ในการอธิบายปรากฏการณ์การเกิดการหมุนวนของอากาศภายในท่ออุปกรณ์หล่อเย็นแบบหมุนวนหรือท่อวอร์เทกซ์

### 1.5 ขอบเขตของการทดสอบ

1.5.1 ความดันของอากาศที่ทางเข้าท่อวอร์เทกซ์ให้มีค่าระหว่าง 2 bar, 2.5 bar, 3.0 bar, 3.5 bar, 4.0 bar และ 4.5 bar ตามลำดับ

1.5.2 เปลี่ยนขนาดรูปทรงที่มีความเอียงมุมของท่อวอร์เทกซ์สามารถปรับค่าได้ 2 องศา, 4 องศา และ 6 องศา ตามลำดับ

1.5.3 ช่องกระจายอากาศ (Gap) ปรับค่าได้ระหว่าง 0.5 mm, 1 mm, 1.5 mm, 2 mm, 2.5 mm และ 3.0 ตามลำดับ

1.5.4 ทำการวัดอุณหภูมิ ณ ตำแหน่ง T1-T10 ภายในท่อวอร์เทกซ์ โดยตำแหน่ง T1-T10 วัด K-1 กลางท่อ, K-2 ระหว่างกลางท่อกับผนังท่อ และ K-3 ตำแหน่งผนังท่อ ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ในงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น มิอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์อื่นใด การนำเอกสารนี้ไปใช้โดยไม่ได้รับอนุญาตถือว่าผิดกฎหมายและต้องรับผิดชอบต่อเอกสารที่นำออกไปใช้

## 1.6 ขั้นตอนของการศึกษา

1.6.1 ศึกษารวบรวมข้อมูลเกี่ยวกับท่ออุปกรณ์หล่อเย็นแบบหมุนวนที่การไหลแบบขนานกัน (Parallel Flow Type)

1.6.2 สร้างชุดทดลองและคำนวณการออกแบบท่ออุปกรณ์หล่อเย็นแบบหมุนวน ที่การไหลแบบขนานกัน (Parallel Flow Type)

1.6.3 ทำการทดลองหาค่าตัวแปรที่มีผลกระทบและข้อผิดพลาด ในการทดลองของความเปลี่ยนแปลงความดันอากาศที่ทางเข้า, องศาความเย็งมุมของปลายท่อ, ช่องช่วยกระจายอากาศ (Gap) และตำแหน่งของการวัด

1.6.4 ทำการวิเคราะห์ผลการทดลอง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 2

### ทฤษฎีพื้นฐาน

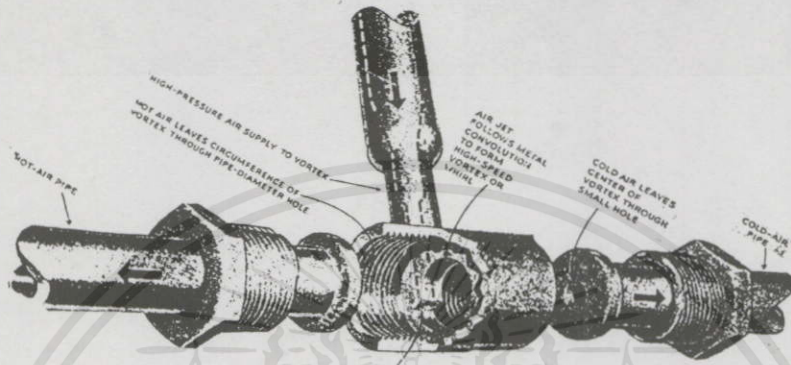
#### 2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับอุปกรณ์หล่อเย็นแบบหมุนวนหรือวอร์เทกซ์

ปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นภายในทอว์ออร์ทกซ์ ถูกค้นพบครั้งแรกในปี ค.ศ.1933 โดย George Ranque [1] ซึ่งเป็นผู้เชี่ยวชาญทางฟิสิกส์ ได้ทำการศึกษาปรากฏการณ์การแยกพลังงาน (Energy Separation) ภายในทอว์ออร์ทกซ์เป็นครั้งแรก โดยการปล่อยอากาศอัดตัวไหลผ่านเข้าในแนวสัมผัสกับทอว์ออร์ทกซ์ ซึ่งพบว่าอากาศที่บริเวณผนังทอว์ออร์ทกซ์มีความหนาแน่นสูงกว่าอากาศบริเวณกลางทอว์ออร์ทกซ์ ได้นำหลักการที่ค้นพบมาสร้างอุปกรณ์ทำความเย็นแบบหมุนวน (Vortex Cooling Device)

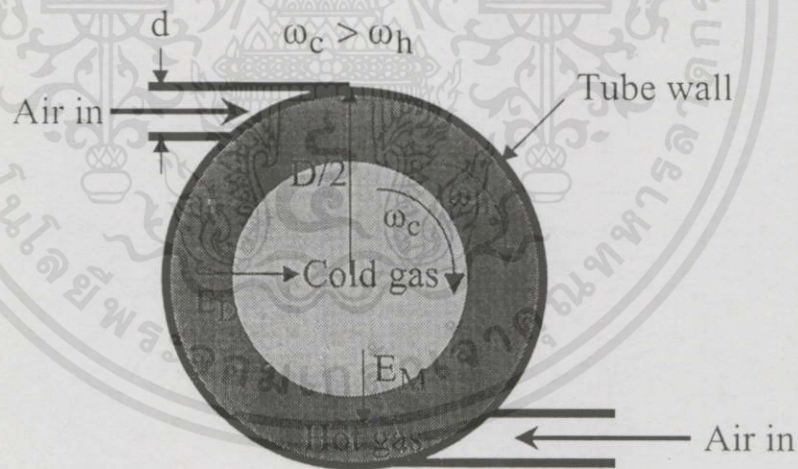
ทอว์ออร์ทกซ์จัดว่าเป็นอุปกรณ์ทำความเย็นที่ง่ายที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับอุปกรณ์ทำความเย็นแบบอื่นๆ เพราะจะใช้เพียงอากาศอัดตัวเป็นสารทำงาน ทฤษฎีที่จะอธิบายปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นกล่าวว่า อากาศอัดที่มีความดันสูงไหลผ่านหัวฉีดเข้าไปในทอว์ออร์ทกซ์ ในแนวเส้นสัมผัสกับเส้นรอบทอว์ออร์ทกซ์ การไหลของอากาศออกจากหัวฉีดอย่างทันทีทันใด จะอยู่ในรูปของลมวนอิสระคือจะมีความเร็วของการหมุนวนของอากาศสูงที่ส่วนกลางของทอว์ออร์ทกซ์ และมีความเร็วของการหมุนวนของอากาศต่ำที่รอบนอกใกล้กับผนังของทอว์ออร์ทกซ์ แต่เนื่องจากว่าอากาศเป็นสารชนิดหนึ่งที่มีความหนืด จึงทำให้เกิดมีแรงเสียดทานขึ้นในชั้นของการหมุนวนของอากาศ จึงทำให้เกิดลักษณะการไหลที่เรียกว่า Force Vortex ขึ้น คือจะมีความเร็วในการหมุนวนของอากาศตรงจุดศูนย์กลางทอว์ออร์ทกซ์จะค่อยๆลดลง โดยที่ความเร็วในการหมุนวนของอากาศส่วนที่อยู่ใกล้กับผนังทอว์ออร์ทกซ์จะเพิ่มขึ้น ซึ่งการเปลี่ยนแปลงความเร็วในการหมุนวนของอากาศจากลักษณะลมวนอิสระไปเป็น Force Vortex ตามที่กล่าวมาแล้วนั้นจะสามารถวัดความเร็วได้โดยการใช้ Pilot Tube วัดความเร็วผลจากการเปลี่ยนแปลงความเร็วในการหมุนวนของอากาศนี้จะก่อให้เกิดการเคลื่อนที่ของโมเมนตัม จากจุดศูนย์กลางทอว์ออร์ทกซ์ไปสู่ผนังทอว์ออร์ทกซ์ เมื่อพิจารณาตามกฎการอนุรักษ์พลังงานซึ่งกล่าวไว้ว่า พลังงานไม่มีการสูญหายนั่นคือพลังงานจากโมเมนตัมจะถูกถ่ายเทไปเป็นพลังงานความร้อน ฉะนั้นจึงทำให้มีการเคลื่อนที่ของพลังงานความร้อนของอากาศจากจุดศูนย์กลางของทอว์ออร์ทกซ์เคลื่อนที่ออกไปสู่บริเวณใกล้กับผนังทอว์ออร์ทกซ์ ส่งผลให้อุณหภูมิของอากาศที่จุดศูนย์กลางทอว์ออร์ทกซ์ต่ำกว่าอุณหภูมิของอากาศที่ใกล้กับผนังทอว์ออร์ทกซ์ ซึ่งจะมีอุปกรณ์ที่จะใช้ทำการทดลองได้มีการติดตั้งตัวกระจายความร้อนไว้ตรงด้านท้ายของทอว์ออร์ทกซ์เพื่อทำให้เกิดการขยายตัวของอากาศที่คั้งขึ้น อันจะทำให้อุณหภูมิของอากาศตรงจุดศูนย์กลางทอว์ออร์ทกซ์ใกล้กับหัวฉีดมีอุณหภูมิที่ต่ำลงมากยิ่งขึ้น หลังจากนั้นได้มีการวิจัยที่เกี่ยวข้องเกี่ยวกับทอว์ออร์ทกซ์อย่างต่อเนื่องดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในปี ค.ศ.1946 Rudolph Hilsch [2] วิศวกรชาวเยอรมัน ได้ทำการทดลองการเปลี่ยนความดันที่ทางเข้าและขนาดของทอว์อ์เทกซ์ และเปรียบเทียบสมรรถนะของอุปกรณ์หล่อเย็นแบบหมุนวนกับเครื่องทำความเย็นทั่วไป พบว่าอุปกรณ์หล่อเย็นแบบหมุนวนมีสมรรถนะทำความเย็นต่ำกว่าอุปกรณ์ทำความเย็นชนิดอื่นๆ



รูปที่ 2.1 แสดงอุปกรณ์การทดลอง Hilsch



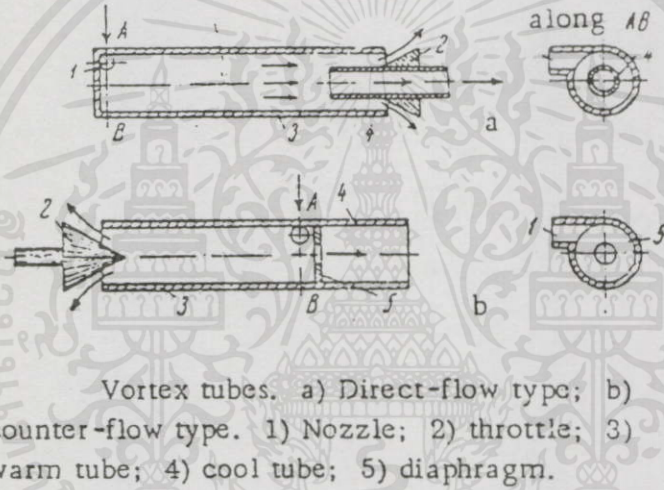
รูปที่ 2.2 แสดงอากาศที่ไหลผ่านเข้าหัวฉีดของอุปกรณ์การทดลอง

ในปี ค.ศ.1950 Fulton [3] ได้พยายามศึกษาการแยกพลังงาน (Energy Separation) ภายในทอว์อ์เทกซ์ โดยสมมุติว่าผลจากการแตกเปลี่ยนพลังงานระหว่างอากาศใกล้แนวแกนกลางท่อจะมีความเร็วเชิงมุมที่สูงมาก (Higher Angular Velocity) และอากาศที่ใกล้บริเวณท่อจะมีความเร็วเชิงมุมที่ต่ำ (Lower Angular Velocity) เป็นผลให้อากาศที่บริเวณแนวแกนท่อไปเพิ่มความเร่งของ

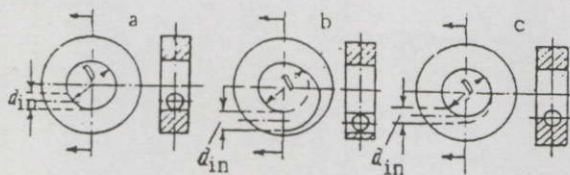
อากาศบริเวณขอบท่อ Fulton อธิบายโดยใช้สมการการไหลภายในท่อที่ประกอบด้วยการไหลในแนวรัศมี (Radial Flow) และการไหลในแนวแกนท่อ (Axial Flow)

ปี ค.ศ. 1951 Schulte-Grunow [4] ได้อธิบายการแยกพลังงาน (Energy Separation) ใช้ความรู้เกี่ยวกับการถ่ายเทความร้อนแบบปั่นป่วน (Turbulent Heat Transfer) ในการไหลที่แบ่งเป็นชั้น ๆ

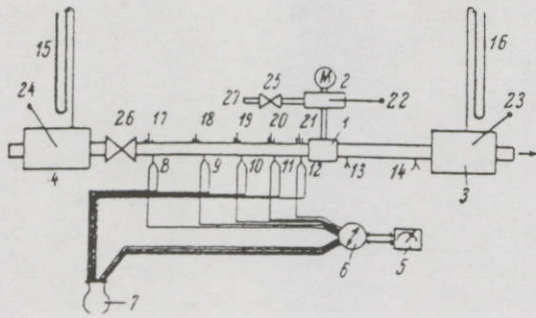
ปี ค.ศ. 1957 Martynovskii และ Alekseev [5] ได้ทำการทดลองเกี่ยวกับความแตกต่างของโครงสร้างท่ออุปกรณ์หล่อเย็นแบบหมุนวนที่มีผลต่อความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างอากาศร้อนและอากาศเย็นมากที่สุดที่เป็นไปได้ และทำการเปลี่ยนรูปแบบหัวฉีด (Nozzle) เพื่อให้ได้รูปที่ดีที่สุด ดังรูปที่ 2.2-2.6



รูปที่ 2.3 การไหลสวนทางกันและตามกันของ Martynovskii และ Alekseev



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
รูปที่ 2.4 แสดงส่วนหัววอร์เทกซ์ ที่มีขนาดต่างๆ ของ Martynovskii และ Alekseev



Experimental apparatus. 1) Vortex tube receiver; 2) compressed air receiver; 3, 4) gas thermostats; 5) potentiometer; 6) electric switch; 7) Dewar flask; 8-14) thermocouple junctions; 15, 16) liquid manometers; 17-21) static pressure connections; 22, 23, 24) mercury thermometers; 25) valve; 26) tube throttle; 27) input compressed air.

รูปที่ 2.5 อุปกรณ์การทดลองของ Martynovskii และ Alekseev



รูปที่ 2.6 แสดงท่อวอร์เทกซ์ ที่มีขนาด 9-16 mm ของ Martynovskii และ Alekseev

ปี ค.ศ. 1963 Thomas A. Blatt และ Raymond B. Trusch [6] ได้ทดลองการพัฒนาอุปกรณ์หล่อเย็นแบบหมุนวนของ Hilsch [2] โดยการทดลองเรื่อง An Experimental Investigation of an Improved Vortex Cooling Device ได้วิจัยผลการทดลองของ Vortex Cooling ที่ได้ทำการพัฒนาขึ้นจากของ Hilsch [2] ปรากฏว่ามีประสิทธิภาพที่สูงขึ้น ดังนี้คือ ในตำแหน่งของแกนวอร์เทกซ์ จะเกิดการลดลงของอุณหภูมิที่มากขึ้น (ซึ่งสอดคล้องกับอัตราส่วนของความดันโดยรวม) โดยสามารถที่จะนำไปทำเครื่องทำความเย็นแบบง่าย ๆ ที่มีประสิทธิภาพสูง โดยมีปริมาตรที่ไม่มากนักการพัฒนาประสิทธิภาพกระทำโดยการกักบริเวณการไหลของลมวนปราศจากการไหลออกของอากาศเย็น ทำการเพิ่มรัศมีของการแพร่กระจายของอากาศที่ปลายท่อที่สั้น ในที่นี้ได้นำเสนอเฉพาะ 2 คุณลักษณะเท่านั้น ข้อดีของ Vortex Cooling คือไม่มีชิ้นส่วนใดเคลื่อนไหว ดังนั้นจึงเป็นอุปกรณ์ที่สามารถไว้วางใจสูง และมีประสิทธิภาพสูงเหมาะสมสำหรับงาน ที่มีอัตราค่าถ่ายเทความร้อนต่ำ ไม่ว่าจะกรณีใดทั้งนี้เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในสภาวะที่มีการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิสูง ซึ่งไม่เหมาะกับอุปกรณ์ที่มีชิ้นส่วนที่ต้องเคลื่อนไหว

งานวิจัยนี้กล่าวถึงประสิทธิภาพของเครื่องมือทำความเย็นที่อุณหภูมิต่ำ ซึ่งดำเนินโดยข้อกำหนดดังนี้ อากาศที่ความดันสูงจะถูกอัดตัวโดยหัวฉีดในแนวสัมผัส เข้าสู่ผนังท่อที่ปลายของท่อ โดยอากาศจะถูกรวมเข้าโดยตัวกระจายอากาศในแนวรัศมี ดังนั้นจะก่อให้เกิดพลังงานจลน์ของการไหลขึ้นเป็นผลเนื่องจากการเพิ่มขึ้นของความดันสถิตย์

จะมีการวัดอุณหภูมิตลอดแนวศูนย์กลางของอุปกรณ์ ซึ่งมีค่าค่อนข้างต่ำ หมายความว่า เกิดการทำความเย็นที่ส่วนของศูนย์กลางขึ้น เป็นผลจากการสังเกตการทดสอบอุปกรณ์การไหลของลมวน ซึ่งทำโดย Trusch ที่ Hamilton Standard และพัฒนาต่อเนื่องโดย Northern Research ซึ่งร่วมกับ UAC

หลักการทำความเย็นของ Hilsch [2] สามารถอธิบายโดยคร่าวๆ ได้ดังนี้

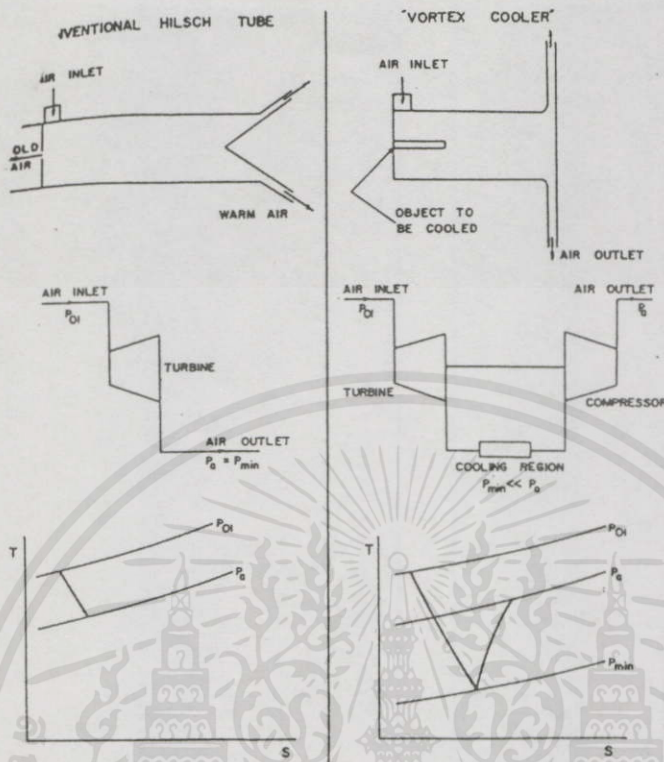
ลักษณะการไหลแบบ Basic Irrotation ในอุปกรณ์นี้เป็นแบบลมวนอิสระ ที่ซึ่งความเร็วของของไหลจะเพิ่มขึ้นเมื่อรัศมีลดลง อย่างไรก็ตาม ผลจากแรงจากความหนืด มีแนวโน้มที่จะก่อให้เกิดรูปแบบของการไหล อันจะทำให้แรงนี้หายไป ซึ่งเป็นลักษณะการหมุนแบบ Solid-Body ดังนั้นการกระทำของแรงหนืด ก่อให้เกิดอัตราเร่งที่ผิวด้านนอกของการไหล ในขณะที่ก่อให้เกิดความหน่วงที่ผิวด้านใน นั่นคือ อนุภาคของของไหลจะวิ่งผ่านจากแนวด้านนอกเข้าสู่ด้านในอย่างต่อเนื่อง และคาดว่าจะมีการลดลงของอุณหภูมิเกิดขึ้น ซึ่งสังเกตได้จากการทดลอง เนื่องจากการกระทำของแรงหนืดจะมีผลมากที่สุดที่แนวศูนย์กลาง จึงอาจจะคาดหวังได้ว่าที่แนวนี้ เป็นส่วนสำคัญอย่างยิ่งในการหมุนแบบ Solid-Body ดังนั้นความเร็วสัมผัสมีความสัมพันธ์ต่ำและแตกต่างกันระหว่างคุณสมบัติของ ความเฉื่อยและหยุดนิ่งเล็กน้อยมาก

สำหรับท่อลมวนแบบเดิม การทำความเย็นสูงสุด จะเกิดขึ้นที่ค่ากลางๆของอัตราส่วนของการไหลของอากาศเย็นต่ออากาศร้อน ในช่วง 0 – 1 กรณีที่ไม่มีอากาศเย็นไหลหรือมีน้อยมาก ประสิทธิภาพของการทำความเย็นของอากาศที่ออกมาจาก ท่ออากาศเย็นเกือบเป็น 0 อย่างไรก็ตาม เมื่อวัดอุณหภูมิภายในของการไหลที่แกนของลมวน ซึ่งติดกับหัวฉีด การลดลงของอุณหภูมิจะเกิดสูงสุดเมื่อไม่มีการไหลของอากาศเย็น

การทดลอง Thomas A. Blatt และ Raymond B. Trusch [6] แตกต่างจากเดิมของ Hilsch 2 ส่วนคือ

1. ไม่มีอุปกรณ์ที่ให้อากาศเย็นไหล นั่นคือ ไม่พยายามที่จะให้อากาศเย็นจากแนวศูนย์กลางไหลออก โดยการปิดหัวฉีด ก่อให้เกิดแรงดันสถิตย์อย่างต่อเนื่อง ซึ่งอาจจะต่ำกว่าความดันที่ขับออกมา

2. ในส่วนของตัวแพร่กระจายที่ทางออกของอากาศ จะมีผลกระทบต่อการเพิ่มขึ้นของพลังงานจลน์อย่างมีนัยสำคัญ ที่แนวด้านนอกของท่อดอร์เทกซ์ ดังนั้นความดันในแนวศูนย์กลางขณะทำการทดลอง จะต่ำกว่าความดันที่ขับออกมา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

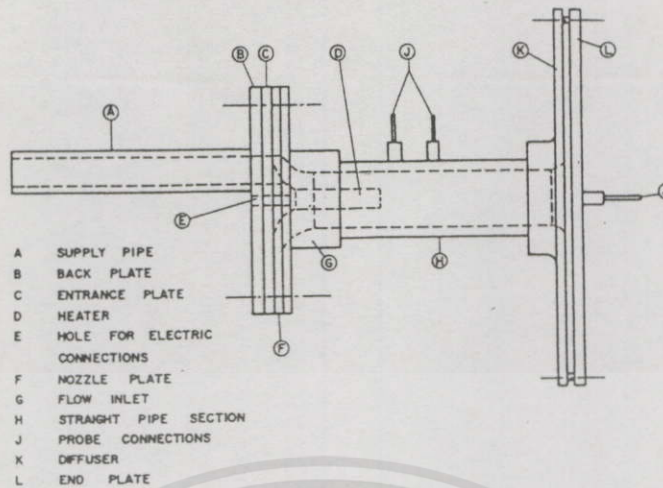


รูปที่ 2.7 แสดงการเปรียบเทียบการลดลงของ Vortex Cooling เปรียบเทียบกับ Hilsch Tube

ความแตกต่างที่เกิดขึ้นเป็นผลเนื่องจากการลดลงของอุณหภูมิที่เข้า กับตำแหน่งศูนย์กลางของ Isentropic Temp. ที่มากกว่า ที่ความดันเข้าและออกมากกว่าของ Hilsch Tube นั้นเอง ในบางกรณี อุณหภูมิที่ลดลงมีค่ามากกว่า Isentropic Temp. ที่ลดลงอีก

Vortex Cooling ถูกค้นพบโดย Ranque [1] ในปี 1931 และสานต่อโดย Hilsch [2] ในปี 1944 แต่ยังเป็นที่ยังสนใจในปัจจุบัน ช่วงปี ค.ศ. 1944 – 1988 มีทฤษฎีและผลการทดลองออกมามากมาย ในที่นี้จะกล่าวถึงเฉพาะงานของ Hartnett , Eckert [10] และ Lay [16] ผู้ที่ให้ความกระจ่างของทฤษฎี คือ Deissler และ Perlmutter [17] ซึ่งก่อนหน้านี้นี้มีการอธิบายการเคลื่อนของเครื่องบินเฉพาะความเร็วในแนวสัมผัสและแนวรัศมี แต่ทั้งสองเสนอว่ามีในแนวแกนด้วย ซึ่งเกิดที่มุมที่ความเร็วของการไหลผ่านเปลี่ยนแปลงไปจากแนวรัศมีเป็นแนวสัมผัส ทฤษฎีนี้ถูกแก้ไขให้ถูกต้องโดย Savino และ Ragsdale [18] ซึ่งสร้างท่อทวนขนาดใหญ่ ที่มีโครงสร้างเหมือนของ Deissler และ Perlmutter [16] ในการทดลองนี้ แสดงให้เห็นว่า ไม่มีการแยกกันของอุณหภูมิใน Free Vortex ที่ด้านนอกของมุมและเมื่อเกิดการแยกกันของอุณหภูมิจะเกิดขึ้นทั้ง 3 แกน

ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น ออกพิมพ์ให้มามีเหตุผลแบบลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงชื่อของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.8 เครื่องมือทดสอบ

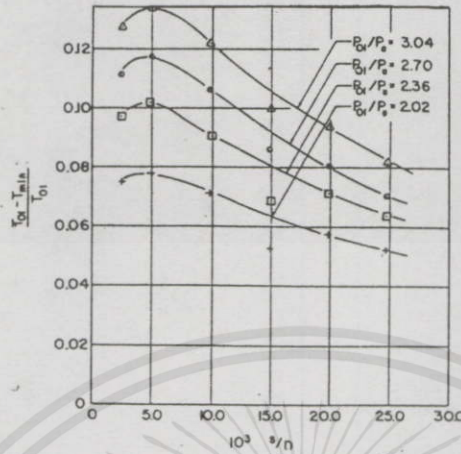
รายละเอียดของเครื่องมือในงานทดลองจับนี้กล่าวไว้ว่า จุดประสงค์หลักของการออกแบบ คือ เพื่อให้มีความยืดหยุ่นในการเปลี่ยนในหลายๆ มิติของเครื่องมือ มิติที่สำคัญมากคือ รูปทรงของเครื่องมือ ซึ่งแสดงในรูปที่ 2.8 ในการทดลองจะป้อนอากาศเข้าผ่านท่อขนาด  $\frac{3}{4}$  in

- A. เชื่อมติดกับเหล็กคาร์บอนที่แผ่นเหล็กด้านหลัง
- B. ทางเข้า 2 แบบ
- C. สำหรับอากาศ มี 2 แบบ คือ รูปกรวย และแผ่นเรียบ
- D. เครื่องมือวัด ติดตั้งที่แกนกลาง
- E. อากาศไหลผ่านท่อ  $\frac{3}{4}$  in ผ่านแผ่นเหล็กเจาะรู ซึ่งทำมุม 90 องศา กับหัวฉีดอากาศเข้า
- F. เปลี่ยนแปลงมาใช้แผ่นเหล็ก ที่มีความหนาหรือรูปแบบแตกต่างกัน หรือใช้มากกว่า 1 แผ่น
- G. เปลี่ยนลักษณะการเข้าของอากาศ แบบ Smooth และ Sharp
- H. เปลี่ยนระยะ Thread ( ระยะ x )
- I. -
- J. อากาศไหลออกสู่ตัวแพร่กระจาย (Diffuser Plate)
- K. เชื่อมติดกับแผ่นเหล็กแผ่นสุดท้าย หรือตัวปิดกระจายอากาศ (End Plate)
- L. สามารถเปลี่ยนตัวแพร่กระจายของอากาศ โดยการเปลี่ยนระยะห่างของแผ่นเหล็ก

### รูปทรงที่ดีที่สุด

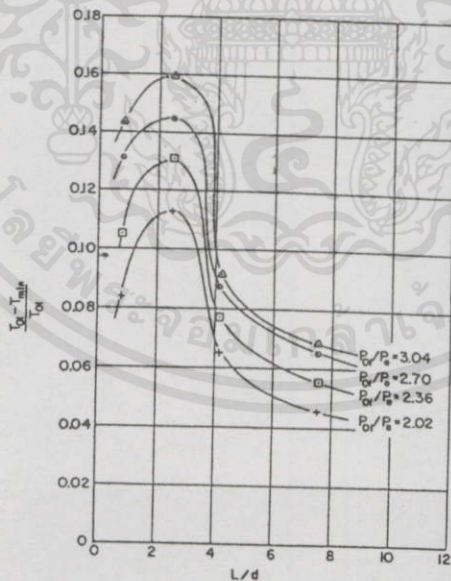
เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การบรรลุดังรูปแบบที่ดีที่สุด ในกรณีที่มีตัวแปรหลายตัว โดยดูได้จากการลดลงของ อุณหภูมิสูงสุด  $(T_{01} - T_{min}) / T_{01}$  ซึ่งไม่มีหน่วย อุณหภูมิจะถูกวัดโดยเครื่องมือที่ทำจาก Copper-Instantan อุณหภูมิค่าสุดท้ายที่วัด คือ ณ ตำแหน่ง  $x = d, r = 0$



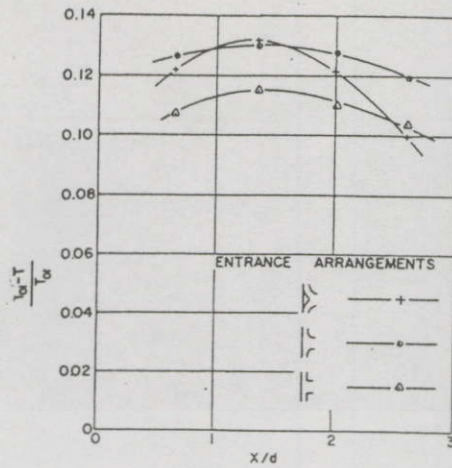
รูปที่ 2.9 ผลของการวัดตัวแปรกระจายขนาดที่ให้ผลดีที่สุด (Diffuser Optimization)

ผลของการวัดแสดงใน รูปที่ 2.9 เส้นผ่านศูนย์กลางของ ตัวแปรกระจาย ขนาด 10 in และแปรเปลี่ยนไป โดยการเปลี่ยนระยะห่าง เมื่อเปลี่ยนค่าอื่นจะไม่มีการเปลี่ยนแปลงค่านี้



รูปที่ 2.10 ผลของการทดลองกรณีเปลี่ยน Pipe Length

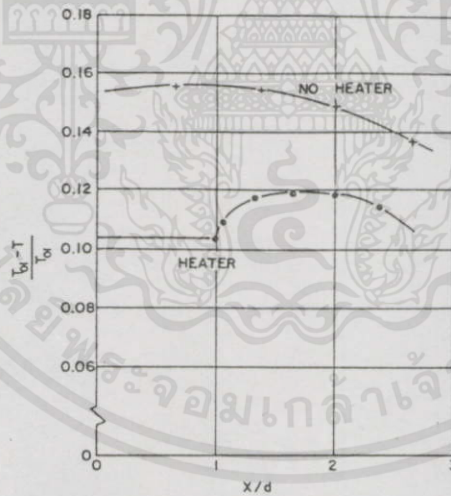
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีที่ผิดเบี่ยงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.11 การทดสอบที่มีการเปลี่ยนรูปแบบของทางเข้า

จากผลลัพธ์ที่ได้ แสดงให้เห็นว่า การลดลงของอุณหภูมิสูงสุดเกิดเมื่อ  $x/d = 1 - 1.5$  ซึ่งเกิดขึ้นเมื่อมีการปรับอากาศเข้า ทั้งแบบกรวยและแบบเรียบ แต่แบบเรียบจะนิยมกว่า เนื่องจากให้อุณหภูมิที่แผ่นด้านหลังต่ำกว่า และมีลักษณะการแพร่กระจายของอุณหภูมิอย่างเป็นรูปแบบ

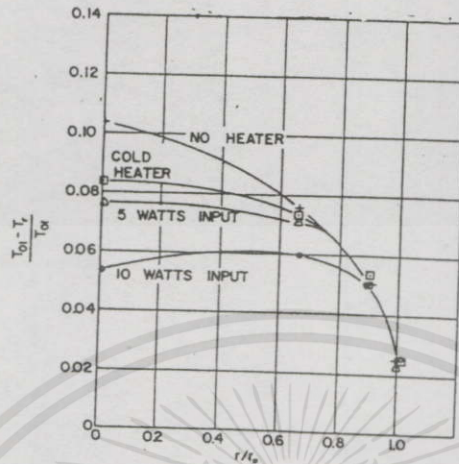
พื้นที่หัวฉีดสูงสุดจะให้ผลสูงสุด หมายความว่าถ้าอัตราการไหลภายใต้ความดันคงที่ซึ่งมาก อัตราการลดลงของอุณหภูมิยิ่งมาก



รูปที่ 2.12 แสดงผลของปัจจัยที่มีผลต่ออุณหภูมิ ณ ตำแหน่งแกน

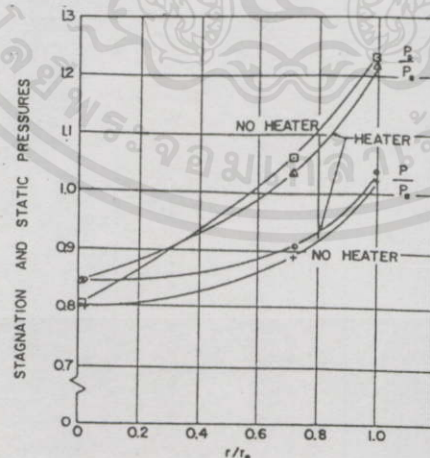
รูปที่ 2.12 แสดงผลของปัจจัยที่มีผลต่ออุณหภูมิ ณ ตำแหน่งแกน แสดงให้เห็นว่าการใส่ตัวทำความร้อน ที่ตำแหน่งนี้จะทำให้อุณหภูมิสูงขึ้นเล็กน้อย อันเป็นผลเนื่องจากแพร่กระจายของรูปแบบการไหล สิ่งที่น่าสนใจคือ เมื่อปราศจากตัวทำความร้อน จะเกิดการลดของอุณหภูมิสูงสุด ณ ตำแหน่ง  $x = d$  เมื่อมีตัวทำความร้อนจะกลายเป็น  $x = 1 + d$  ซึ่ง 1 คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของตัวทำ

ความร้อน เพราะฉะนั้น ถ้าให้การลดลงมีประสิทธิภาพสูงสุด พื้นผิวของตัวทำความร้อนต้องต่ำสุด และอัตราการถ่ายเทความร้อนจะสูงสุด ก็ต่อเมื่อเส้นผ่าศูนย์กลางของตัวทำความร้อนต่ำสุด



รูปที่ 2.13 แสดงถึงการแพร่กระจายของการลดลงของอุณหภูมิในแนวรัศมี

รูปที่ 2.13 แสดงถึงการแพร่กระจายของการลดลงของอุณหภูมิในแนวรัศมี โดยมีปัจจัยจากตัวทำความร้อน และ เครื่องให้ความร้อนอื่นๆ ที่ตำแหน่ง  $r = 0$  อุณหภูมิจะสูงขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของความร้อนที่ส่งเข้ามา แต่ความร้อนทุกแบบจะไม่ส่งผลกระทบต่ออัตราการแพร่กระจายของอุณหภูมิด้าน  $r > 0.66r$ . ผลของ Temp. Probe และ Diffuser Probe เกิดขึ้นที่ตำแหน่ง  $r = r$ . ซึ่งอุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิอากาศเข้า การแพร่กระจายของอุณหภูมิในแนวรัศมี วัด ณ ตำแหน่ง  $x = 1.9d$



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

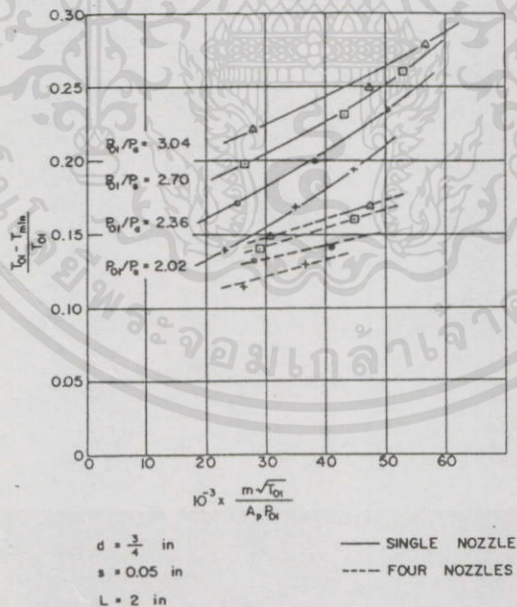
รูปที่ 2.14 แสดงให้เห็นถึงการลดลงและคงที่ของความดัน ที่กระจายในแนวรัศมี

ไม่ว่ากรณีใดๆ พึงสงวนสิทธิ์ในเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 2.14 แสดงให้เห็นถึงการลดลงและคงที่ของความดัน ที่กระจายในแนวรัศมี แสดงให้เห็นว่า ความร้อนจากตัวทำความร้อนหรืออื่นๆ ไม่มีผลต่อการแพร่กระจาย ที่ตำแหน่ง  $r = 0$  การลดลงหรือคงที่ของความดันเกือบเท่ากับที่แสดง เมื่อความเร็วในแนวแกนเป็น 0

มุมของการไหลวัดโดย Yaw - Probe ในทางปฏิบัติไม่ใช่ขึ้นกับอัตราส่วนความดัน แต่ขึ้นกับ  $r/r_0$  และมุมของการไหลเป็น 0 เมื่อ Probe เจอกับ Upstream การวัดความดันที่ ตำแหน่ง  $r = 0$  จะไวต่อมุมของ Probe และในขณะที่ ความเร็วในแนวศูนย์กลางเป็น 0 มุมของการไหล ที่  $r = 2/3r_0$  เป็น 84 องศา - 90 องศา และที่  $r = r_0$  เป็น 62 องศา - 73 องศา

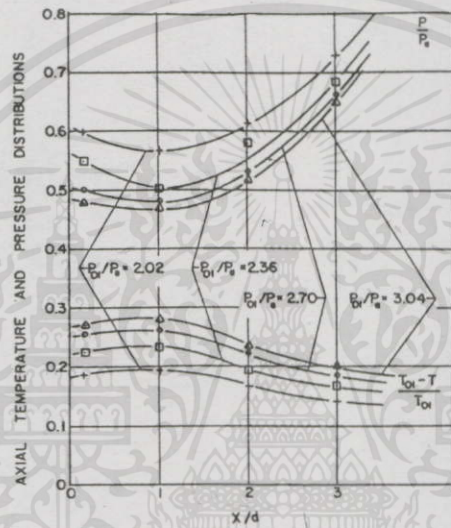
ลักษณะการทำงานของ Vortex Cooling ส่วนสุดท้ายของงานทดลองเกี่ยวกับการออกแบบการพัฒนา การทดสอบต้นแบบ ปัจจัยที่มีผลมากที่สุด คือ อัตราการไหลต่อหน่วยในแนวแกนของพื้นที่ท่อ ซึ่งทำให้อุณหภูมิลดลงสูงสุด ในขณะที่ความดันคงที่ การเพิ่มอัตราการไหลทำได้โดยเพิ่มพื้นที่หัวฉีด โดยการลดเส้นผ่าศูนย์กลางในส่วนท่อกลาง เป็นวิธีสุดท้ายในการแก้ปัญหาที่จะเลือกเนื่องจาก ข้อจำกัดของความจุของ Air Supply ที่มีอยู่ เครื่องต้นแบบถูกพัฒนาด้วยท่อเส้นผ่าศูนย์กลางขนาด  $3/4$  in ในขณะที่ปัจจัยอื่นถูกตั้งให้ค่าสูงสุดแล้ว ในที่นี้จะกล่าวถึงผลของการไหลในแนวแกนต่อพื้นที่ ที่มีผลให้อุณหภูมิลดลงสูงสุดเป็นสิ่งแรก ปัจจัยอัตราส่วนความดันและขนาดของหัวฉีดเปลี่ยนไป คือ ความดันเปลี่ยนจาก 2.02, 2.36, 2.70 เป็น 3.04 และขนาดหัวฉีดเปลี่ยนจาก 0.0621, 0.1150 เป็น  $0.1587 \text{ in}^2$  จะถูกทดสอบ



รูปที่ 2.15 แสดงค่าการลดลงของอุณหภูมิจะเพิ่มขึ้น เมื่ออัตราการไหลของมวลเพิ่มขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งนี้ ข้อจำกัดของเครื่องต้นแบบจะมีขนาดเพียงครึ่งหนึ่งของเครื่องดั้งเดิม ดังนั้น  
 จึงควรที่จะมีอัตราการไหลของมวลในแนวแกนมากกว่าเป็นสี่เท่า แต่เราพบว่า ความเร็วของมวลใน

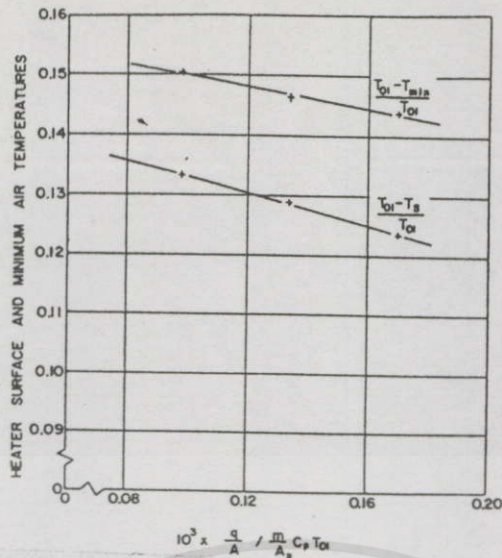
เครื่องต้นแบบนั้นไม่เป็นไปตามนั้น ถึงแม้ว่าจะมีอัตราส่วนความดันที่สูง อัตราการไหลจริงกลับต่ำกว่า Choke Flow ที่สอดคล้องกับพื้นที่ของหัวฉีด อาจเป็นไปได้ว่ามี Choke Flow ภายในเครื่องมือที่ตำแหน่งอื่นนอกจากตำแหน่งหัวฉีด ปัจจัยของการไหลที่กำหนดคือ อัตราส่วนของการไหลจริงต่อ Choke Flow และ ในการทดลองจะกำหนดสัดส่วนกันหลายๆแบบ การเพิ่มขึ้นของค่า  $f$  ทำให้โดยลักษณะของหัวฉีด และเพิ่มอัตราส่วนความดัน ซึ่งค่านี้สำหรับเครื่องต้นแบบอยู่ระหว่าง 0.455 – 0.764 ผลที่ได้แสดงออกมามีรูปที่ 2.15 ซึ่งเห็นได้ว่าอัตราการลดลงของอุณหภูมิจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว เมื่ออัตราการไหลของมวลเพิ่มขึ้น และเส้นประจะแสดงถึงการแทนที่ของหัวฉีดเดี่ยว เป็นหัวฉีดสี่หัวที่มีขนาดพื้นที่วงกลมเท่ากัน ผลที่ออกมาที่น่าสนใจมากคือการลดลงของอุณหภูมิจะต่ำกว่าแบบหัวเดี่ยว



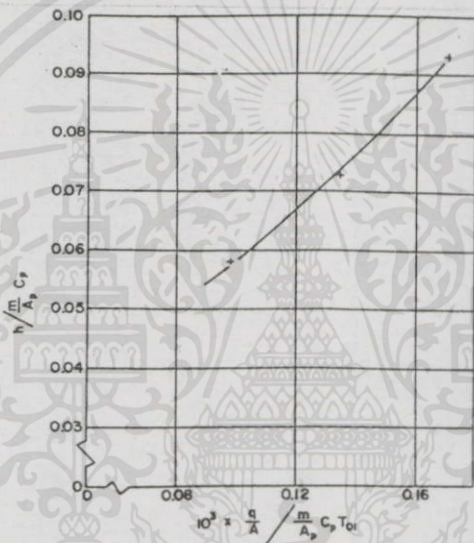
รูปที่ 2.16 อุณหภูมิและการแพร่กระจายความดันในแนวแกน

อุณหภูมิและการแพร่กระจายความดันในแนวแกน ที่รัศมีเท่ากับ 0 แสดงในรูปที่ 2.16 เช่นเดียวกับของเดิม อุณหภูมิและความดันต่ำสุด เกิดขึ้นที่  $x/d = 1$  อัตราส่วนของอุณหภูมิที่เปลี่ยนไป/อุณหภูมิที่เข้า ในช่วง  $0 < x/d < 1.5$  น้อยมาก แสดงให้เห็นรูปแบบการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิตามแนวผิวของตัวทำความร้อน ที่ความดันต่ำกว่าครึ่งหนึ่งของความดันอากาศล้อมรอบ ขนาดความยาว 1.5 in แห่งทองแดงมีเส้นผ่าศูนย์กลาง 1/8 in และให้ความร้อนที่ปลายด้านนอกเครื่อง การวัดอุณหภูมิจะวัดที่นอกบริเวณทดสอบ และความร้อนที่เข้าจะแสดงดังสมการ  $q = A k (dT/dX) x = 0$  โดย  $x$  วัดจากปลายสุดของบริเวณทดสอบ สัมประสิทธิ์การส่งผ่านความร้อนคำนวณจาก  $h = (q/A) / (T_s - T_{min})$  โดย  $T_s$  วัดจากตัววัดความร้อนแบบ ทองแดง ที่ผิวของเครื่องทำความร้อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.17 เลข Stanton ของ Heat Flux

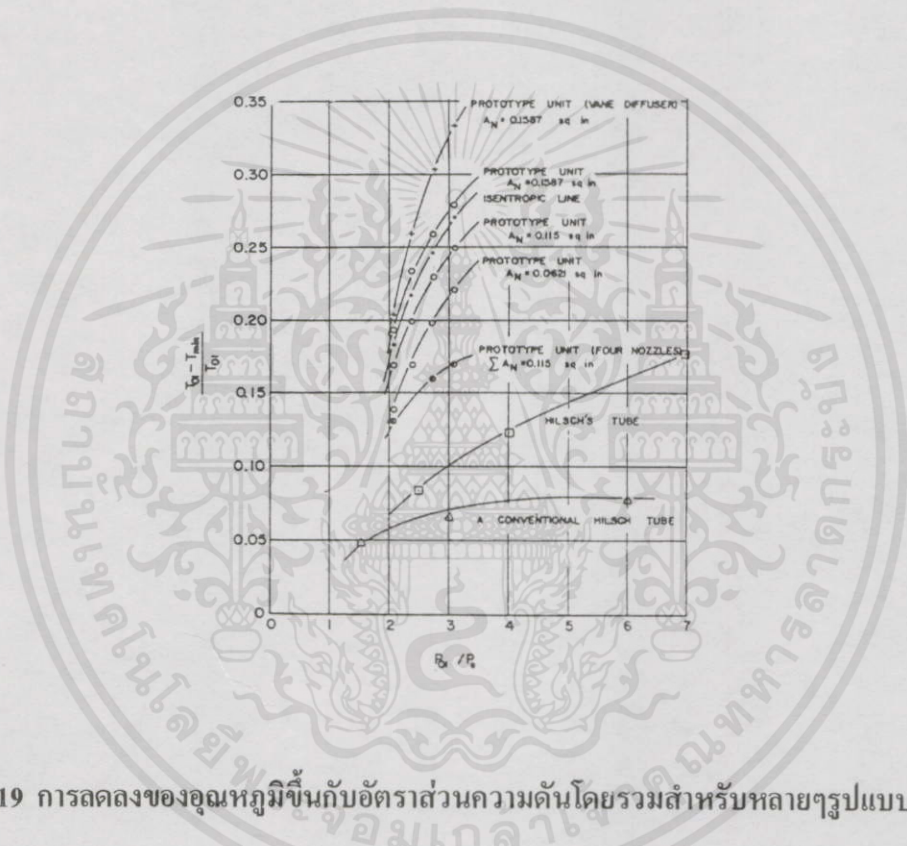


รูปที่ 2.18 แสดงประสิทธิภาพการทำความเย็นและอุณหภูมิของพื้นผิวของตัวทำความร้อน

รูปที่ 2.18 แสดงให้เห็นว่า อุณหภูมิของอากาศต่ำสุดและอุณหภูมิของพื้นผิวของตัวทำความร้อน ขึ้นกับขนาดของ ตัวแปรของ Heat Flux นั่นคือการเพิ่มขึ้นของ Heat Flux สัมประสิทธิ์ของการถ่ายเทความร้อนจะเพิ่มขึ้นตาม แต่ เป็นเพียงในช่วงแคบๆ การเพิ่มขึ้นของ Heat Flux ทำให้ อุณหภูมิของพื้นผิวตัวทำความร้อน และอุณหภูมิต่ำสุดของอากาศ เพิ่มขึ้นด้วย ซึ่งเป็นสิ่งที่ไม่เป็นที่ต้องการ ในทางกลับกันตัวทำความร้อนที่ใหญ่กว่ากลับเป็นที่ต้องการ เนื่องจากการเพิ่มขึ้นจะทำให้ ได้อุณหภูมิของอากาศที่ต่ำกว่า

ในตอนทำงานวิจัย ได้กล่าวถึงปัญหาบางประการของประสิทธิภาพของตัวแปรกระจาย คือ ในช่วงที่การทำงานสูงสุด การไหลออกจากตัวแปรกระจายจะสมมาตร ในขณะที่เปลี่ยนแผ่นให้อากาศเข้าจากแผ่นกรวยเป็นแผ่นเรียบจะเกิดการ ไม่สมมาตรขึ้น การทดสอบเครื่องต้นแบบชี้ให้เห็นว่า มีการไหลของอากาศผ่านเพียงส่วนเล็กๆของตัวแปรกระจาย การประเมินประสิทธิภาพของตัว

แพร่กระจาย ที่พื้นผิวจะถูกปกคลุมด้วยน้ำมันและมีร่องรอยของแนวการไหลเกิดขึ้น สิ่งที่เกิดขึ้นได้และน่าสนใจอย่างยิ่งคือ แนวการไหลจะเบี่ยงเบนสูงสุดแค่ 1/8 in ทุกระยะทาง ประมาณ 5 in มุมระหว่างแนวการไหลและทิศทางของรัศมีจะประมาณ 22 องศา - 28 องศา ซึ่งชี้ให้เห็นว่ามีการหมุนวนเกิดขึ้นเล็กน้อยในการไหลในแนวรัศมี ดังนั้นสามารถที่จะเพิ่มประสิทธิภาพได้โดยการเพิ่มตัวแพร่กระจาย (Vane Diffuser) ซึ่งจะทำให้รูปแบบการไหลดีขึ้น ทำให้สามารถลดอุณหภูมิได้มากขึ้น 3 - 21 เปอร์เซ็นต์ การพัฒนามากที่สุดเกิดขึ้นที่อัตราส่วนความดันสูงขึ้น เนื่องจากตั้งค่าการไหลจะสอดคล้องกับมุมของการแยกแนวการไหลที่อัตราส่วนความดัน 2.7 ความดันแกน 4.8 psia และอุณหภูมิลดลง 178 °F ที่อัตราส่วนความดัน 3.04



รูปที่ 2.19 การลดลงของอุณหภูมิขึ้นกับอัตราส่วนความดันโดยรวมสำหรับหลายรูปแบบ

การลดลงของอุณหภูมิขึ้นกับอัตราส่วนความดันโดยรวมสำหรับหลายรูปแบบในขณะที่ไม่มีตัวทำความร้อน ซึ่งไม่มีหน่วย แสดงดังรูปที่ 2.19 ผลลัพธ์ที่ดีที่สุดสำหรับเครื่องต้นแบบคือ ใช้หัวฉีดตัวเดียวกับตัวแพร่กระจาย สำหรับเครื่องที่มีขนาดใหญ่ และ เครื่องต้นแบบ ที่มี 4 หัวฉีด ผลที่ได้ออกมาจะมีประสิทธิภาพต่ำกว่า แต่ก็ยังสูงกว่าเครื่องของ Hilsch [2] นับได้ว่าประสบความสำเร็จ ข้อสรุปข้อเสนอแนะในรายงานนี้แสดงให้เห็นว่า เครื่องต้นแบบจะมีประสิทธิภาพสูงสุดที่ขนาดความจุ 5 - 10 watt ค่าเฉลี่ยของ Mach Number ในแนวแกนจะเป็นปัจจัยที่สำคัญที่ใดในการลดอุณหภูมิ การติดตั้งเครื่องทำความร้อนจะทำให้ประสิทธิภาพลดลง การทดสอบจะวัดการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิและความดันทั้งแนวแกนและแนวรัศมี พบว่าการลดลงของอุณหภูมิสูงสุดเกิดขึ้นที่

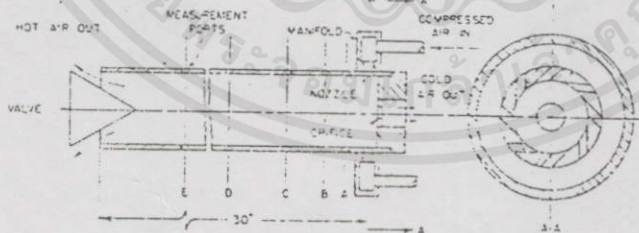
รัศมี เท่ากับ 0 และ  $x = 1 - 1.5 d$  การใช้ตัวแพร่กระจายที่ความดัน 4.8 psia อุณหภูมิ -108 °F พบว่า จะมีการไหลเฉพาะที่แนวของท่อ หมายความว่าเกิดการปิดกั้นอากาศที่อัตราการไหลที่ต่ำกว่า และ เห็นได้ชัดว่าการใช้หัวฉีดหลายหัว และตัวแพร่กระจายที่ดีขึ้นจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของเครื่อง และการใช้เครื่องทำความร้อนจะมีประโยชน์เฉพาะที่ ช่วงแคบๆ คือ 0.1 - 1.0 เปอร์เซ็นต์ ของ Air-Enthalpy Flux และขนาดของเครื่องควรมีขนาดเล็ก อย่างไรก็ตาม Vortex Cooler ที่พัฒนาขึ้น สามารถลดอุณหภูมิได้มากกว่าของ Hilsch [2]

ปี ค.ศ. 1964 Linderstrom-Lang [7] ศึกษารายละเอียดในการประยุกต์ในการแยกของ อากาศที่เป็นแบบผสม (Mixture Gas) กับขนาดท่อ โดยการแสดงให้เห็นว่าผลของการแยกอากาศ ขึ้นอยู่กับอัตราส่วนการไหลของมวลของอากาศร้อนและมวลของอากาศเย็น

ปี ค.ศ. 1965 Takayama [8] ได้เสนออิทธิพลของความชื้นของอากาศที่มีผลต่อการแยก พลังงาน (Energy Separation) โดยการทำการทดลองกับท่อวอร์เท็กซ์แบบหมุนวนที่มีความชื้น ของอากาศที่แตกต่างกัน และพบว่าความชื้นมีผลต่อการแยกพลังงานในท่อวอร์เท็กซ์

ปี ค.ศ. 1971 William [9] ได้ทำการเลือกใช้สารในการทดลองคือ แอมโมเนีย มีเทน และ คาร์บอนไดออกไซด์ พบว่าสัดส่วนการลดลงของอุณหภูมิจะขึ้นอยู่กับสัดส่วนของความดันที่ทาง เข้า

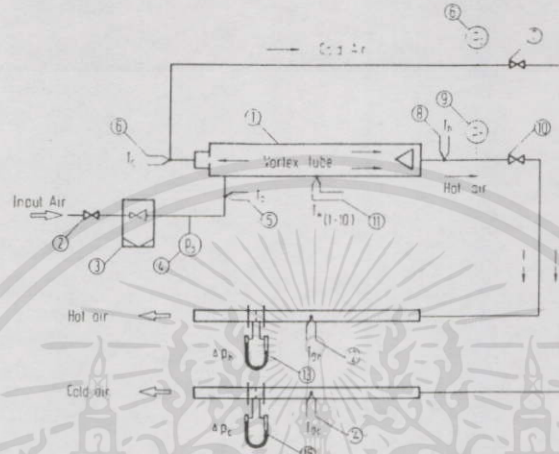
ในปี ค.ศ. 1976 Hartnett และ Eckert [10] ได้ทำการวัดอุณหภูมิและความดันที่จุดต่าง ๆ กันภายในท่อ และผลของการติดตั้ง Come-Shaped Valve ที่มีขนาดมุมช่วงต่าง ๆ และสัดส่วน ความดันที่ทางเข้าท่อที่มีผลต่อการแพร่กระจายอุณหภูมิกายในท่อ



เอกสารนี้รูปที่ 2.20 แสดงอุปกรณ์การทดลองของ Hartnett และ Eckert อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปี ค.ศ. 1977 Marshall [11] ได้ทำการเปลี่ยนของผสมและขนาดของท่อต่าง ๆ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าจุดวิกฤติของ Reynolds Number มีผลต่อการแยกพลังงาน

ปี ค.ศ. 1984 Stephan และคณะ [12] ได้ทำการศึกษาการแยกของพลังงาน (Energy Separation) ในทอเวอร์เทกซ์ โดยอาศัยตัวแปรไร้มิติช่วยในการศึกษาผลจากการทดลอง



รูปที่ 2.21 แสดงอุปกรณ์การทดลองของ Stephan และคณะ

ปี ค.ศ. 1985 นักสิทธิ์ คูวัฒนาชัย [13] ได้ทำวิจัยในประเทศไทยขึ้น ได้ทำการทดลองโดยการเปลี่ยนขนาดท่อแบบต่าง ๆ ที่มีผลต่อการแพร่กระจายอุณหภูมิที่ทอเวอร์เทกซ์ งานวิจัยนี้เป็นของภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ซึ่งใช้บรรทัดฐานจากงานทดลองของ Hilsch [2] การทดลองนี้ได้ทำการทดลองโดยให้อากาศไหลเข้าในแนวสัมผัสกับท่อ และพบว่าอากาศที่ออกจากท่อที่ใกล้กับผนังมีอุณหภูมิสูงกว่าอากาศบริเวณแนวแกนของท่อและได้พิสูจน์แล้วว่าสามารถนำไปทำความเย็นได้ ซึ่งได้ทำการทดลองโดยการเปลี่ยนความดันที่ทางเข้า โดย Hilsch [2] ได้กำหนดค่าในการออกแบบ ดังนี้

Inner diameter	(D = 17.6 mm.)
Length	(L = 20D = 352 mm.)
Diameter of the inlet air nozzle	( $\delta$ = 4.1 mm.)
Diameter of the cold air exit air orifice	( $d_c$ = 6.5 mm.)

เอกสารนี้และกำหนดอัตราส่วนมวลของการกำเริบเป็นการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$(y = m_c/m_0)$$

(2.1)

โดยที่  $m_c$  คือ มวลของอากาศที่ทางออกลมเย็น ส่วน  $m_0$  คือมวลของอากาศทั้งหมด

จากความสัมพันธ์ของเอนโทรปีกับสมบัติอื่นๆในทางเทอร์โมไดนามิกนั้น เมื่อทำการพิจารณาว่าระบบนั้นมีการทำงานแบบย้อนกลับได้ จากกฎข้อที่หนึ่งของเทอร์โมไดนามิกเมื่อไม่คิดการเปลี่ยนแปลงของพลังงานจลน์และของพลังงานศักย์

$$\Delta Q_{\text{rev}} - \Delta W_{\text{rev}} = \Delta U \quad (2.2)$$

เนื่องจาก  $\delta Q_{\text{rev}} = Tds$ ;  $\delta W_{\text{rev}} = PdV$

ดังนั้น  $Tds = dU + PdV$

หรือ  $(Tds = du + Pdv) \quad (2.3)$

จากนิยามของเอนโทรปี

$$h = u + Pv$$

$$dh = du + Pdv + vdP$$

ดังนั้น  $Tds = dh - vdP \quad (2.4)$

จากสมการดังกล่าวข้างต้นใช้ในการหาการเปลี่ยนแปลงเอนโทรปีของระบบ โดยสามารถใช้ได้กับทั้งสารทำงานที่เป็นก๊าซอุดมคติและสารบริสุทธิ์ที่ไม่เป็นก๊าซอุดมคติ แต่โดยส่วนใหญ่มักจะนำไปประยุกต์ใช้กับสารทำงานที่เป็นก๊าซอุดมคติ ทั้งนี้การเปลี่ยนแปลงเอนโทรปีของก๊าซอุดมคติได้ว่า

$$du = C_v dT \quad \text{และ } P = RT/v$$

$$dh = C_p dT \quad \text{และ } v = RT/P \quad (2.5)$$

เมื่อนำไปแทนในสมการข้างต้น จะได้ว่า

$$ds = C_v dT/T + R dv/v$$

และ  $ds = C_p dT/T + R dP/P \quad (2.6)$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งนี้ เมื่อทำการอินทิเกรต จะได้สมการการเปลี่ยนแปลงเอนโทรปีจากสภาวะที่ 1 ไปยังสภาวะที่ 2 และเนื่องจากการทำงานอยู่ในช่วงของอุณหภูมิที่ไม่กว้างนัก จึงจัดว่าเป็นกรณีที่ความร้อนจำเพาะ

คงที่ ประกอบกับพิจารณาที่การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิและความดันตาม T-S ไดอะแกรม แล้วนำมาวิเคราะห์กระบวนการขยายตัวของอากาศอัดแบบย้อนกลับได้จากสภาวะเริ่มต้น ไปยังสภาวะสุดท้ายตามขบวนการไอเซนโทรปิก ( $s_1 = s_2 = 0$ ) จะได้อุณหภูมิที่ลดลงตามขบวนการไอเซนโทรปิก ดังนี้คือ

$$(\Delta T) = T_m - [T_m / (P_m/P_c)^{(k-1)/k}] \quad (2.7)$$

งานวิจัยนี้ใช้ท่อลมวนที่ประกอบด้วยอุโมงค์ลมวน และท่อทางด้านเย็นและทางด้านร้อน ซึ่งอุโมงค์ลมวนทำจากทองเหลืองตันขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50.8 mm ยาว 73.025 mm โดยทำการเจาะรูผ่านศูนย์กลางให้ขนาดเท่ากับออริฟิส (Orifice) (D/2) คือ 6.35 mm แล้วใช้มีดกลึงขยายเส้นผ่านศูนย์กลางออกให้เท่ากับ 12.7 mm โดยให้ออริฟิส (Orifice) มีความหนา (D/8) เท่ากับ 1.59 mm สำหรับหัวฉีดนั้นได้เจาะให้มีเส้นผ่านศูนย์กลาง (D/4) เท่ากับ 3.175 mm โดยให้มีระยะทางจากจุดศูนย์กลางของแผ่นออริฟิส (Orifice) เท่ากับ 3.175 mm สำหรับท่อด้านเย็นและด้านร้อน ใช้ท่อทองเหลืองขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 12.7 mm หนา 1.59 mm สวมเข้ากับอุโมงค์ลมวนสำหรับวาล์วที่ติดทางปล่องด้านร้อนนั้นใช้วาล์วสำหรับท่อน้ำที่มีใช้อยู่ทั่วไป การทดลองเริ่มต้นด้วยการเดินเครื่องอัดอากาศเพื่ออัดอากาศเข้าถังจนมีความดันสูงสุด แล้วจึงเปิดวาล์วให้อากาศออกจากถังไหลเข้าท่อลมวน ปรับอุปกรณ์ควบคุมความดันจนได้ความดันของอากาศเข้าท่อลมวนตามต้องการ แล้วเปิดวาล์วท่อทางด้านร้อนออกเต็มที่ เมื่อได้สภาวะสมำเสมอ บันทึกค่าต่างๆ ดังต่อไปนี้

- ก. ความดันและอุณหภูมิของอากาศที่เข้าท่อ
- ข. อุณหภูมิของอากาศทางด้านเย็น
- ค. อุณหภูมิของอากาศทางด้านร้อน
- ง. การสูญเสียความดัน เมื่ออากาศไหลผ่านเครื่องวัดอัตราการไหลแบบออริฟิส (Orifice) ทั้งด้านเย็นและด้านร้อน

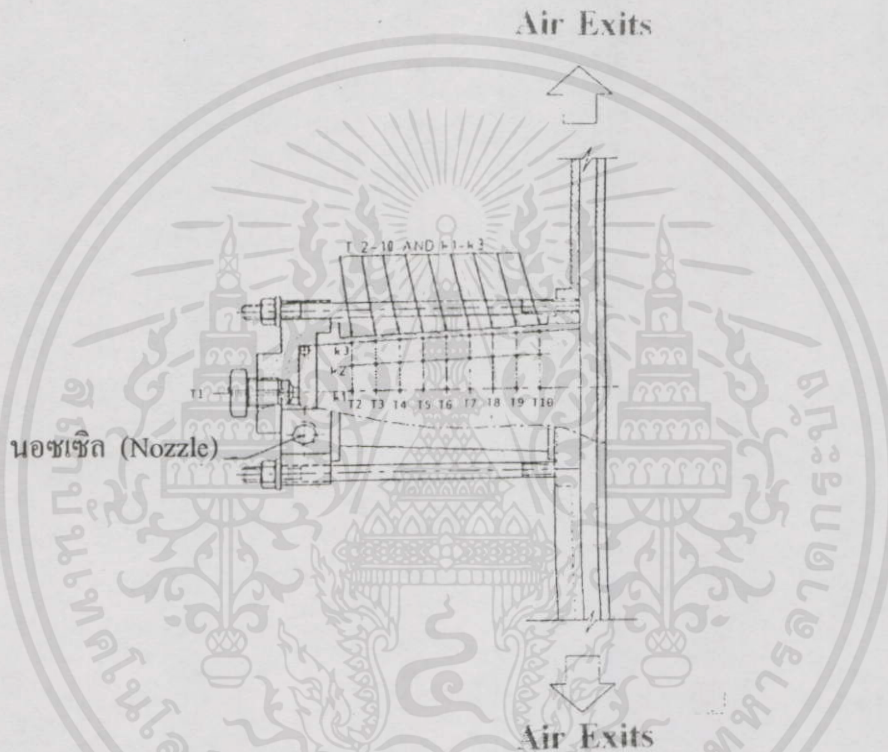
หลังจากนั้น ค่อยๆ ปิดวาล์วของท่อทางด้านร้อนลงประมาณ 1 ใน 10 แล้วดำเนินการเช่นเดิม ทำจนกระทั่งวาล์วของท่อทางด้านร้อนปิดสนิท เปลี่ยนความดันของอากาศที่เข้าท่อแล้วดำเนินการเช่นเดิม สำหรับท่อลมวนขนาดเล็กเส้นผ่านศูนย์กลาง 9.525 mm สามารถที่จะเปลี่ยนแปลงความดันก่อนเข้าท่อจาก 482.636 kN/m<sup>2</sup> จนถึง 34.474 kN/m<sup>2</sup> หลังจากการทดลองได้ทำการหาค่าของอุณหภูมิที่ลดลง  $\Delta T_c = T_m - T_c$  ซึ่งเป็นฟังก์ชันของอัตราส่วนมวลของอากาศเย็นต่อมวลของอากาศที่เข้าท่อลมวน

เอกสารนี้เป็นเอกสารปี ค.ศ. 1999 พงษ์เจด พรหมวงศ์ [14] ได้สร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ เพื่อจะช่วยในการทำนายปรากฏการณ์การไหลในทอว์อร์เทกซ์ของ Hartnett และ

ต่อมาในปีเดียวกัน Frohlingsdorf และ Unger [15] ได้ทำการศึกษาการแยกของพลังงานภายในท่ออุปกรณ์หล่อเย็นแบบหมุนวน โดยได้ทำการใช้โปรแกรม CFX ช่วยในการศึกษาพฤติกรรมและการเพิ่มเทอมของ Shear-Stress-Induced Mechanical Work ลงไป ซึ่งพบว่าผลที่ได้มีความใกล้เคียงกับผลการทดลองของ Bruun ในปี ค.ศ. 1969

## 2.2 หลักการทำงานของอุปกรณ์ทำความเย็นแบบหมุนวน

ทอเวอร์เทกซ์เป็นท่อกลมที่มีทางอากาศเข้าเป็นรูเล็ก หรือเรียกว่า นอซเซิล (Nozzle) ดังรูปที่ 2.23



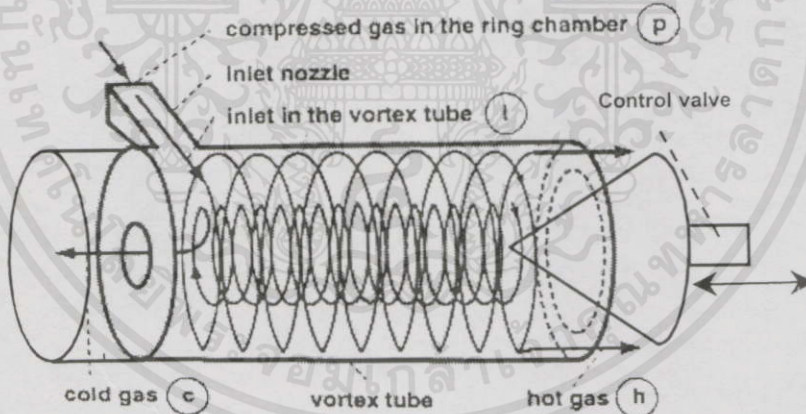
รูปที่ 2.22 ตำแหน่งการวัดของท่ออุปกรณ์

เมื่ออากาศอัดตัวถูกปล่อยเข้ามาในท่อกลมทางหัวนอซเซิล (Nozzle) อากาศเคลื่อนที่แบบหมุนวน ทำให้อากาศส่วนที่อยู่ตรงกลางของท่อมีอุณหภูมิต่ำกว่าอากาศอัดที่ใช้ ส่วนอากาศที่หมุนอยู่รอบนอกจะมีอุณหภูมิสูงกว่าอากาศอัด การแยกอากาศร้อนออกจากอากาศเย็นทำได้โดยการติดตั้งแผ่นออริฟิส (Orifice) ในตำแหน่งใกล้รูหัวฉีด จึงสามารถนำอากาศเย็นไปใช้ในการทำความเย็นได้ จึงเรียกทอเวอร์เทกซ์ว่า “อุปกรณ์ทำความเย็นแบบหมุนวน”

ปรากฏการณ์เกิดอากาศร้อนและเย็นภายในทอเวอร์เทกซ์ มีผู้ได้พยายามอธิบายด้วยวิธีทางคณิตศาสตร์ เช่น Fulton [3] อธิบายโดยใช้สมการการไหลภายในท่อที่ประกอบด้วยการไหลในแนวรัศมี (Radial Flow) และการไหลในแนวแกนท่อ (Axial Flow) หรือ Schulte- Grunow [4] ได้

อธิบายการแยกพลังงาน (Energy Separation) ใช้ความรู้เกี่ยวกับการถ่ายเทความร้อนแบบปั่นป่วน (Turbulent Heat Transfer) ในการไหลที่แบ่งเป็นชั้น ๆ อย่างไรก็ตามการอธิบายด้วยวิธีคณิตศาสตร์ก็มีข้อกำหนดในการตั้งสมมติฐานหลายประการ การเกิดปรากฏการณ์ในท่อวอร์เทกซ์ สามารถอธิบายได้ดังนี้

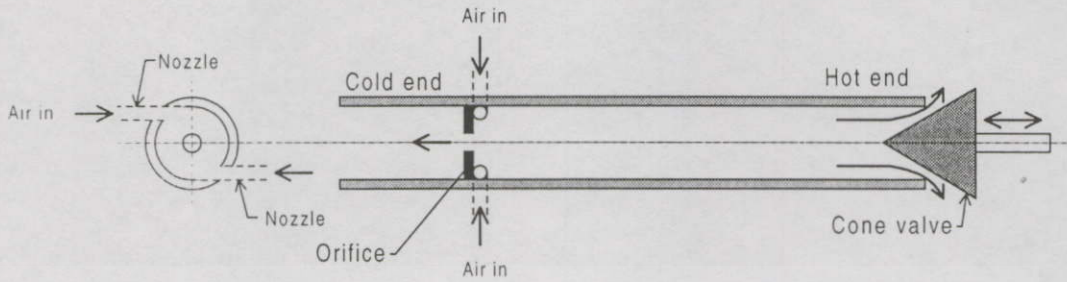
อากาศอัดขยายตัวเข้าไปในแนวของเส้นสัมผัสกับเส้นรอบวงของท่อวอร์เทกซ์ ดังรูปที่ 2.2 การเคลื่อนที่ของอากาศในทันทีทันใดที่ออกมาจากนอซเซิล (Nozzle) ทำให้ความดันอากาศลดลงอย่างฉับพลันจนเข้าใกล้ความดันบรรยากาศและความเร็วของอากาศเข้าใกล้ความเร็วเสียง ทำให้มีแรงหนีศูนย์กลางบังคับให้อากาศหมุนไปตามเส้นรอบวงของขอบท่อ และบริเวณกลางท่อจะเป็นที่ว่างของอากาศ ทำให้เกิดปรากฏการณ์เรียกว่า Free Vortex คืออากาศที่ด้านในมีความเร็วในการหมุนสูงกว่าอากาศที่อยู่ใกล้ผนังท่อ แต่เนื่องจากอากาศมีความหนืด (Viscosity) ทำให้ชั้นความเร็วสูงไปเร่งชั้นความเร็วต่ำให้มีความเร็วเพิ่มขึ้น ทำให้เกิดปรากฏการณ์เรียก Force Vortex คือความเร็วในการหมุนของอากาศที่ด้านนอกสูงขึ้น และอากาศด้านในมีความเร็วในการหมุนต่ำ การที่อากาศหมุนเปลี่ยนจาก Free Vortex ไปเป็น Force Vortex จะเกิดการถ่ายเทพลังงานจลน์ (Energy Transfer) ทำให้อุณหภูมิของอากาศที่อยู่กลางท่อต่ำกว่าส่วนที่อยู่ขอบท่อ



รูปที่ 2.23 อากาศที่ไหลผ่านเข้าหัวฉีดสู่ท่อวอร์เทกซ์

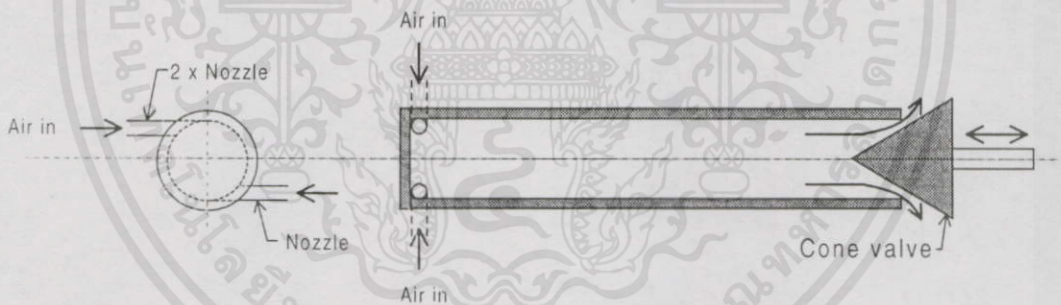
ท่อวอร์เทกซ์สามารถแบ่งออกได้เป็นสองประเภท คือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่แบบไหลสวนทางกัน (Counter Flow Type) ดังแสดงในรูปที่ 2.24 อากาศเย็นไหลออกผ่านแผ่นออริฟิส (Nozzle) ขณะที่อากาศร้อนจะไหลผ่านออกมาด้านวาล์วควบคุมของการไหล (Control Valve)



รูป 2.24 พื้นฐานการทำงานของทอว์เท็กซ์แบบการไหลสวนทางกัน

2. แบบไหลขนานกัน (Parallel Flow Type) หรือเรียกว่าแบบไหลตามกัน (Uniflow Type) ซึ่งเป็นชนิดที่ศึกษาในงานวิจัยนี้ ดังแสดงในรูปที่ 2.25 อากาศร้อนและเย็นไหลออกทางเดียวกัน เนื่องจากมีแผ่นปิดกันทางปลายด้านหนึ่ง เพื่อกักให้อากาศอยู่ภายในท่อให้นานที่สุด



รูป 2.25 พื้นฐานการทำงานของทอว์เท็กซ์แบบการไหลตามทางกัน

### 2.3 ประสิทธิภาพทำความเย็น (Cooling Efficiency)

ประสิทธิภาพทำความเย็นของอุปกรณ์ทำความเย็นแบบหมุนวน ในงานวิจัยนี้จะบอกในรูปของเปอร์เซ็นต์การลดลงของอุณหภูมิเทียบกับอุณหภูมิทางเข้า แสดงเป็นสมการได้ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานในกรณีศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่จำกัดใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาในเอกสารนี้โดยเด็ดขาด  

$$\eta = \left( \frac{T_{in} - T}{T_{in}} \right) * 100 \quad (2.8)$$
 อ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 3

# การสร้างอุปกรณ์ทดลอง

### 3.1 การคำนวณแนวทางที่ใช้ในการออกแบบ

งานวิจัยการพัฒนาและปรับปรุงอุปกรณ์การทำความเย็นแบบวอร์เทกซ์ในครั้งนี้ เป็นการพัฒนาจากอุปกรณ์ทำความเย็นวอร์เทกซ์แบบเดิม ที่มีการไหลสองทางสวนกันมาเป็นแบบที่มีการไหลแบบตามกัน โดยมีขอบเขตของการทำโครงการเป็นท่อที่มีลักษณะเป็นแบบมีอัตราที่มีความเอียงมุมท่อ เพื่อนำมาศึกษาเปรียบเทียบกับอุปกรณ์ที่มีลักษณะการไหลแบบสองทางสวนกัน เพื่อให้ทราบถึงการลดลงของอุณหภูมิว่า รูปแบบใดมีอัตราการลดลงของอุณหภูมิที่จุดศูนย์กลางท่อที่มากกว่ากัน อันจะทำให้สามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้เหมาะสมต่อไป

การออกแบบอุปกรณ์ทำความเย็นแบบที่มีการไหลตามกันตามขอบเขตโครงการที่เสนอนี้ ในปัจจุบันยังไม่มีทฤษฎีที่สามารถอธิบายการทำงานของอุปกรณ์การทำความเย็นแบบดังกล่าวได้อย่างแน่ชัด ดังนั้นในการออกแบบจะเลือกขนาดที่เหมาะสมจากที่มีการทดลองมาแล้วมาใช้เป็นบรรทัดฐานในการออกแบบครั้งนี้ โดยในการออกแบบจะปรับให้เหมาะสมกับวัสดุที่หาได้เป็นประการสำคัญ

#### 3.1.1 การออกแบบเส้นผ่านศูนย์กลางหัวฉีด

การออกแบบขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของหัวฉีดในงานทดลองครั้งก่อนจะมีหลายขนาด แต่จะเห็นได้ว่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่ใหญ่ก็จะได้ค่าของสัดส่วนการลดลงของอุณหภูมิที่มาก โดยคิดที่ 1 หัวฉีด ทั้งนี้การที่จะได้สัดส่วนการลดลงของอุณหภูมิมาก ก็จะต้องมีแหล่งของพลังงานที่สูงด้วย ฉะนั้นการเลือกใช้ขนาดหัวฉีดในการทดลองนี้จะเลือกขนาดที่กำหนดดังนี้

$$\text{ขนาดของหัวฉีด} = 0.0437 \text{ in}^2 \text{ ได้ว่า } d = 5.99 \text{ mm}$$

ทั้งนี้ได้ทำการเพิ่มหัวฉีดเป็นสองหัว เพื่อที่จะลดขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางของหัวฉีดลง เพื่อให้เหมาะสมกับขนาดของถังลมที่จะนำมาใช้ในการทดลอง ดังนั้นแต่ละหัวจะมีขนาด

$$\text{ขนาดของหัวฉีด} = 0.0218 \text{ in}^2 \text{ ได้ว่า } d = 4.24 \text{ mm}$$

เนื่องจากคอกสว่านที่ใช้เจาะทำหัวฉีดไม่มีขนาดดังกล่าว ดังนั้นเพื่อความเหมาะสมในการทดลองนี้ จึงปรับค่า  $d$  เป็น 4 mm แทน ดังแสดงในรูปที่ 3.4

#### 3.1.2 การออกแบบเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อส่วนที่เล็กที่สุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมีการดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงชื่อของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้  
ลักษณะเรียวย ดังนั้นการออกแบบเส้นผ่านศูนย์กลางท่อจึงกำหนดขนาดเฉพาะส่วนที่มีเส้นผ่าน  
ศูนย์กลางที่เล็กที่สุดเท่านั้น ส่วนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางด้านใดจะขึ้นกับความความเอียงของท่อ

นั่นคือจะเปลี่ยนแปลงตามค่ามุมของความเอียงมุมตามที่กำหนด ซึ่งในโครงการนี้มีการเปลี่ยนแปลงความเอียงมุมของท่อเพิ่มขึ้นข้างละ 1 องศา 2 องศาและ 3 องศา ตามลำดับ ค่าที่เลือกที่นำมาใช้ในการทดลองนี้คือ 1.5 in หรือ 38.1 mm และทำการปรับให้เหมาะสมเพื่อที่จะใช้ในการทำชิ้นงานในการทดลองจริงคือ 38 mm ดังแสดงในรูปที่ 3.4

### 3.1.3 การออกแบบความยาวของท่อ

การออกแบบความยาวท่อที่เหมาะสม ทำได้โดยดูจากสัดส่วนความดันต่างๆ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าช่วงที่มีค่าอัตราส่วนการลดลงของอุณหภูมิสูงสุด จะให้ค่า  $L/d = 2.5$  ดังนั้นเราสามารถที่จะคำนวณหาความยาวของท่อได้ดังนี้

เนื่องจาก  $d = 1.5$  in แทนในสมการจะได้ว่า  $L = 3.75$  in ซึ่งเท่ากับ 95.25 mm  
ทำการปรับค่าให้เหมาะสมกับการทำชิ้นงาน จะได้ค่า  $L = 95$  mm ดังแสดงในรูปที่ 3.5

### 3.1.4 การออกแบบขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของตัวแพร่กระจายอากาศ (Diffuser) และ ตัวปิดอากาศ (End Plate)

ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของ Diffuser และ End Plate ทำโดยการเปรียบเทียบจากกราฟ ซึ่งจะเห็นได้ว่า อัตราส่วนการลดลงของอุณหภูมิที่สูงสุด เกิดขึ้น ณ.ตำแหน่ง Gap (s) = 0.05 in จากลักษณะของเส้นที่แสดงสัดส่วนความดันค่าต่างๆ ณ.ตำแหน่งที่ให้ค่าอัตราส่วนการลดลงของอุณหภูมิที่สูง พบว่า

$$s/D * 103 = 5.0$$

เมื่อ D คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของ Diffuser และ End Plate ที่ต้องการหาค่า

แทนค่า  $s = 0.05$  in

ได้ว่า  $D = 10$  in หรือเท่ากับ 254 mm

ดังนั้นจึงเลือกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของ Diffuser และ End Plate ให้มีขนาดเท่ากับ 250 mm

ทั้งนี้จะมีการปรับระยะห่างระหว่าง Diffuser และ End Plate โดยจะให้เป็นแหวนที่มีขนาดความหนาคงที่ เพื่อใช้ในการรองให้เกิดช่องว่างขึ้น โดยจะทำการเพิ่มครั้งละ 0.5 mm จนถึง 3 mm เพื่อศึกษาถึงความสัมพันธ์ของการทำความเย็น อันเนื่องมาจากระยะห่างที่เพิ่มขึ้น ดังแสดงในรูปที่

### 3.8-3.9

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.1.5 การออกแบบ Vortex Chamber

อุปกรณ์ชิ้นนี้จะถูกออกแบบโดยคำนึงถึง ความสะดวกในการสร้างชิ้นงานและการทดลอง เป็นปัจจัยหลัก และเน้นในการลดต้นทุนในการทำ Vortex Chamber เนื่องจากต้องมีการปรับเปลี่ยนความเอียงมุมท่อตามขนาดที่ต้องการในการทดลอง ในส่วนบริเวณที่เป็นปลายท่อด้านทางเข้าของลมนั้นเลือกที่จะให้เป็นแบบผนังเรียบ เนื่องจากสะดวกในการทำชิ้นงาน และมีผลต่อค่าอัตราส่วนการลดลงของอุณหภูมิไม่แตกต่างจากแบบอื่น ดังแสดงในรูปที่ 3.4

### 3.1.6 การออกแบบแรงดันลม

การเลือกใช้แรงดันลมนั้น เลือกที่จะใช้การเพิ่มระดับความดันจาก 2 – 4.5 bar โดยเพิ่มขึ้นทีละ 0.5 bar โดยพิจารณาจากค่าอัตราส่วนการลดลงของอุณหภูมิที่มากที่สุด เกิด ณ.ตำแหน่งที่ค่าของ  $P_{01}/P_a = 3.04$

เมื่อ  $P_{01}$  คือ ความดันคงที่ที่ทางเข้า

$P_a$  คือ ความดันบรรยากาศ

แทนค่า  $P_a$  เท่ากับ 1.01 bar

ดังนั้น แรงดันลมที่ได้คือ 3.07 bar ทั้งนี้ในการทดลองนี้ เพื่อให้ครอบคลุม จึงกำหนดให้แรงดันลมที่เลือกใช้มีค่าเริ่มจาก 2 จนถึง 4.5 bar

### 3.1.7 การออกแบบช่องกระจายอากาศ (Gap)

ช่องกระจายอากาศ (Gap) ที่เหมาะสมคือ 0.05 in หรือประมาณ 1.27 mm แต่ในการทดลองนี้กำหนดไว้ที่ 0.5 mm ถึง 3.0 mm เพื่อให้ครอบคลุม และใช้ในการศึกษาเปรียบเทียบที่ระยะต่างๆ กัน ดังแสดงในรูปที่ 3.7

### 3.1.8 การออกแบบตำแหน่งการวัดค่าอุณหภูมิ

ในการทดลองนี้ได้กำหนดตำแหน่งในการวัดค่าไว้ 10 จุด ตามแนวความยาวของท่อ เพื่อให้ได้ความละเอียดของกราฟเพิ่มมากขึ้น และสามารถใช้อ้างอิงกับการทดลองในหัวข้องานวิจัยเดียวกัน แต่ทำการทดลองโดยเปลี่ยนที่ขนาดความยาว

ระยะห่างตำแหน่งที่ทำการวัดต้องออกแบบตามขนาดความยาวของท่อ และต้องมีจุดที่ทำกรวัดเกิน 4 จุด ทั้งนี้เพื่อความละเอียดของกราฟที่ได้ จะสามารถดูแนวโน้มได้อย่างชัดเจน จึงเลือกที่จะกำหนดค่า = 10 จุด โดยจุดแรกอยู่ที่ปลายท่อด้านลมเข้า T1 และจุดที่ T2 จนถึงจุดที่ T10 จะอยู่ถัดไปตามแนวความยาวของท่อ โดยมีระยะห่างของแต่ละจุดเท่ากับ 8 mm ดังตามรูปที่ 2.22

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

### 3.1.9 ชุดข้อมูลสำหรับท่อออร์ทอกซ์แบบไหลตามกัน

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้ ขนาดของชุดทดสอบที่ใช้ในงานวิจัยจะเลือกขนาดให้ใกล้เคียงกับชุดต้นแบบของ Thomas and Raymond [6] ชุดทดสอบของ Thomas และ Raymond เป็นท่อออร์ทอกซ์แบบตรง ไม่สามารถ

ปรับมุมมองสาคความความเอียงมุมท่อได้ แต่สามารถปรับเปลี่ยนความยาวของท่อ, ขนาดพื้นที่หน้าตัดของหัวฉีด, รูปทรงหัวฉีด, จำนวนหัวฉีด 2 หัว และสามารถปรับช่องกระจายอากาศ (Gap) ได้ จากการทดลองได้ขนาดที่เหมาะสมดังนี้

- ท่อตรงขนาดความยาว 3.75 in หรือ 95.25 mm
- ท่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.5 in หรือ 38.1 mm
- ช่องกระจายอากาศ (Gap) เส้นผ่านศูนย์กลาง 10 in หรือ 254 mm
- พื้นที่หน้าตัดของหัวฉีด 0.00437 in

ข้อมูลเบื้องต้นที่ได้จากชุดทดสอบต้นแบบของ Thomas and Raymond [6] นำมาสร้างเป็นชุดทดสอบในงานวิจัยนี้ และปรับปรุงและคำนวณอุปกรณ์หล่อเย็นแบบหมุนวน โดยทำให้ท่อสามารถปรับองศาความเอียงมุมท่อได้ ปรับช่องกระจายอากาศ (Gap) ได้ และปรับความดันของอากาศด้านทางเข้าได้ ข้อมูลคุณสมบัติของชุดทดลองแสดงในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 ข้อมูลสำหรับท่อออร์เทกซ์แบบไหลตามกัน

ลักษณะของอุปกรณ์		
ความยาวของท่อออร์เทกซ์	95	mm
ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อด้านทางเข้า	38	mm
ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของตัวแพร่กระจายอากาศ Diffuser plate	250	mm
ช่องกระจายอากาศ (Gap)	0.5-3.0	mm
ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของหัวฉีด	4	mm
จำนวนหัวฉีดที่ทางเข้า	2	หัว
มุมที่ทำการขยายที่ปลายท่อ	2, 4, 6	องศา
จำนวนจุดวัดอุณหภูมิ	10	จุด

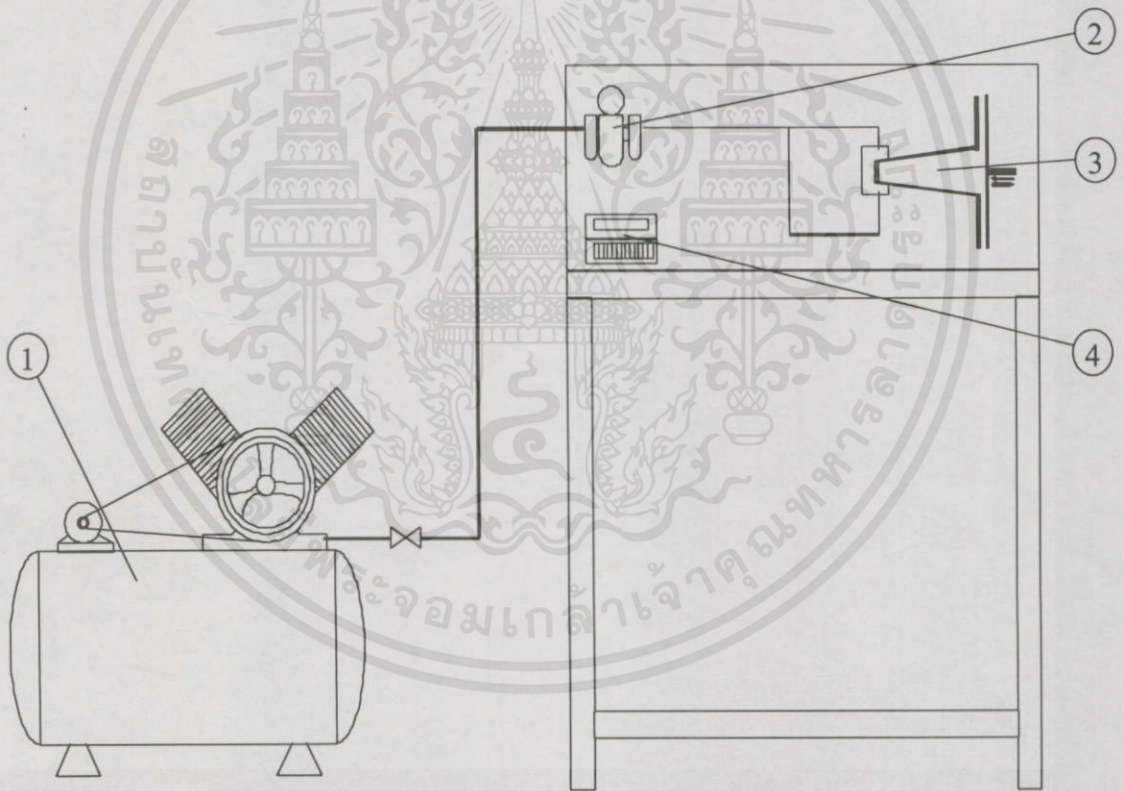
คุณสมบัติของของไหลที่ทางเข้าท่อออร์เทกซ์

ชนิดของไหล	อากาศ
อุณหภูมิ	29 °C
ความดันที่ทางเข้า	2-4.5 bar

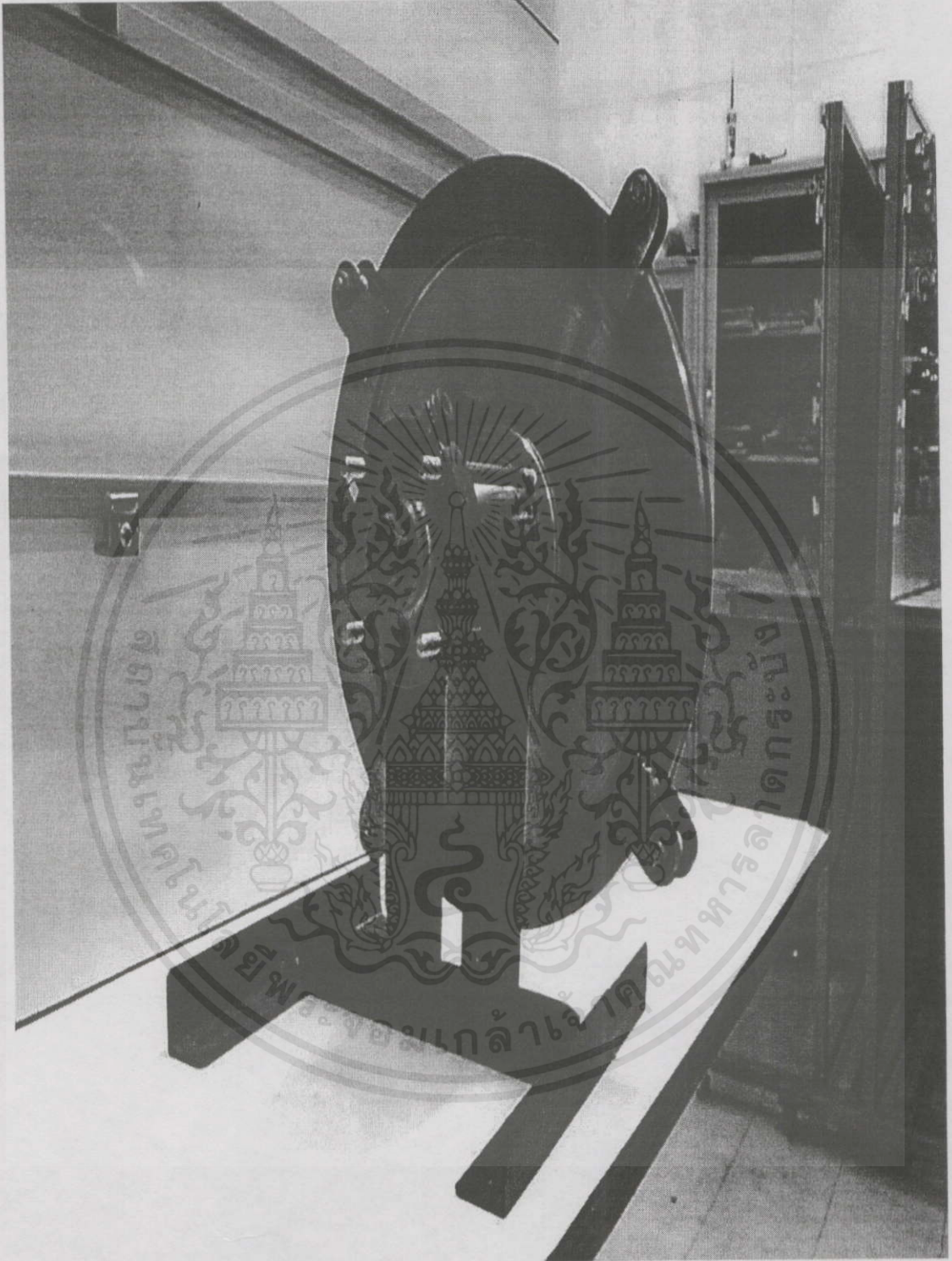
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดบ้างสืบ อีเมลที่แนบมาในอีเมลฉบับนี้ และต้องแจ้งถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีกรณีนำไปใช้

### 3.1.10 ส่วนประกอบอุปกรณ์ทำความเย็นแบบหมุนวนแบบไหลตามกัน

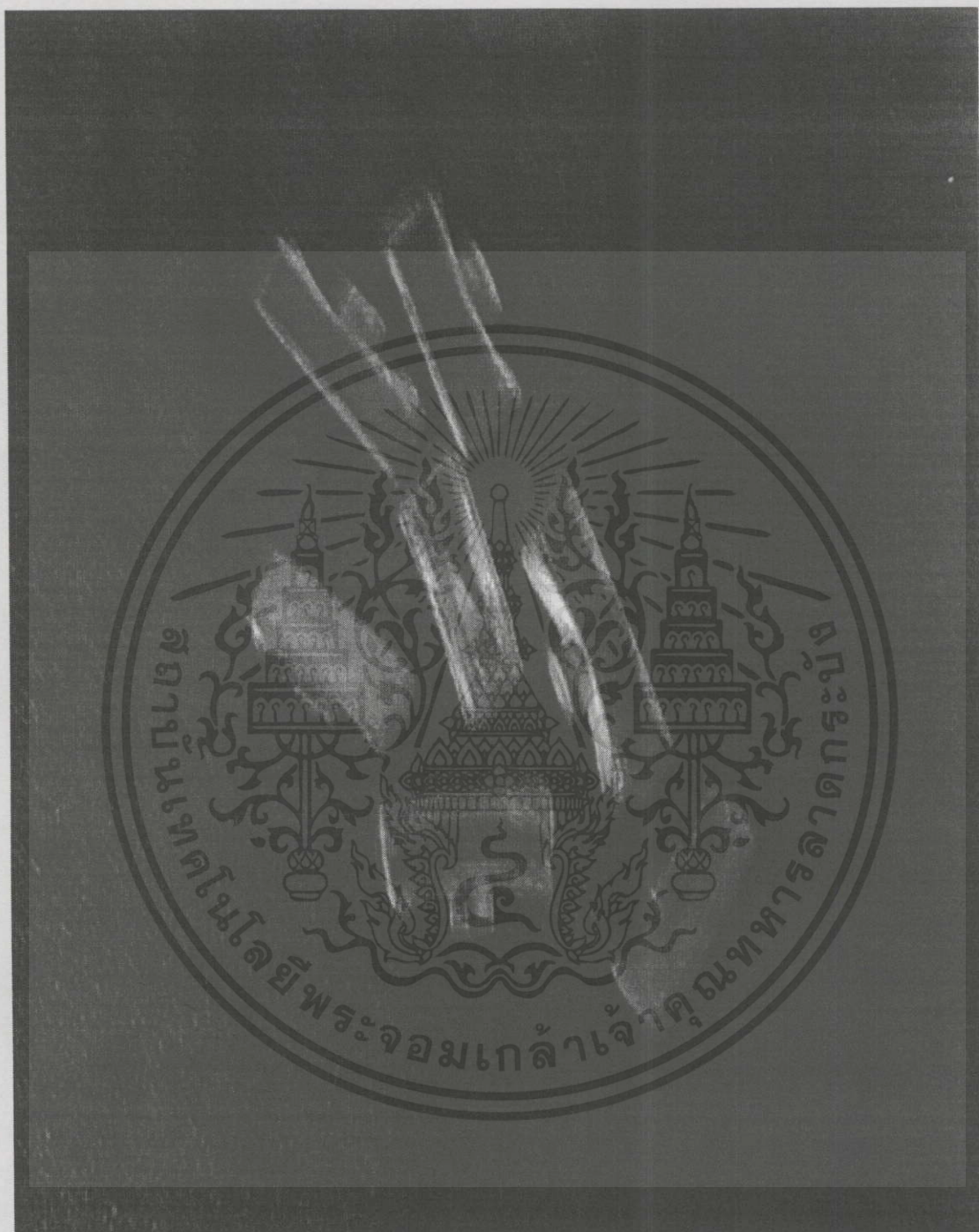
รูปที่ 3.1 แบบชุดทดสอบอุปกรณ์ทำความเย็นแบบหมุนวนแบบไหลตามกัน อากาศจากเครื่องอัดลม ① จะถูกปรับความดันได้โดยชุด Pressure Regulator ② ไหลผ่านท่อสายอากาศขนาด 6 mm เข้าสู่หัวนอสเซิล ③ ซึ่งมีทั้งหมด 2 หัว ท่อวอร์เทกซ์ แสดงในรูปที่ 3.4 สามารถเปลี่ยนขนาดความเอียงมุมท่อได้ แสดงในรูปที่ 3.5 โดยการปรับปลายท่อด้านทางออกของอากาศให้บานออก 2-6 องศา ดังแสดงรูป 3.8 ตัวแพร่กระจายอากาศ (Diffuser) ที่ติดตั้งไว้ปลายท่อจะควบคุมการแพร่กระจายของอากาศภายในท่อ โดยการปรับช่องกระจายอากาศ หรือเรียกว่าระยะ Gap ได้โดยช่องกระจายอากาศจะเป็นแหวนรอง ดังแสดงรูป 3.7 โดยเพิ่มครั้งละ 0.5 mm ดังแสดงรูป 3.1 อุณหภูมิของอากาศภายในท่อจะถูกวัดโดยใช้ Thermocouple ④ ซึ่งวัดได้ 10 จุด ค่าของอุณหภูมิที่วัดได้จะนำมาเปรียบเทียบกับอุณหภูมิของอากาศทางเข้าที่วอร์เทกซ์ เพื่อสังเกตการลดลงของอุณหภูมิภายในท่อวอร์เทกซ์ เพื่อนำมาหาค่าสมรรถนะการทำความเย็นของวอร์เทกซ์



เอกสารนี้เป็นรูปที่ 3.1 แบบชุดทดสอบอุปกรณ์ทำความเย็นแบบหมุนวนแบบไหลตามกัน ำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

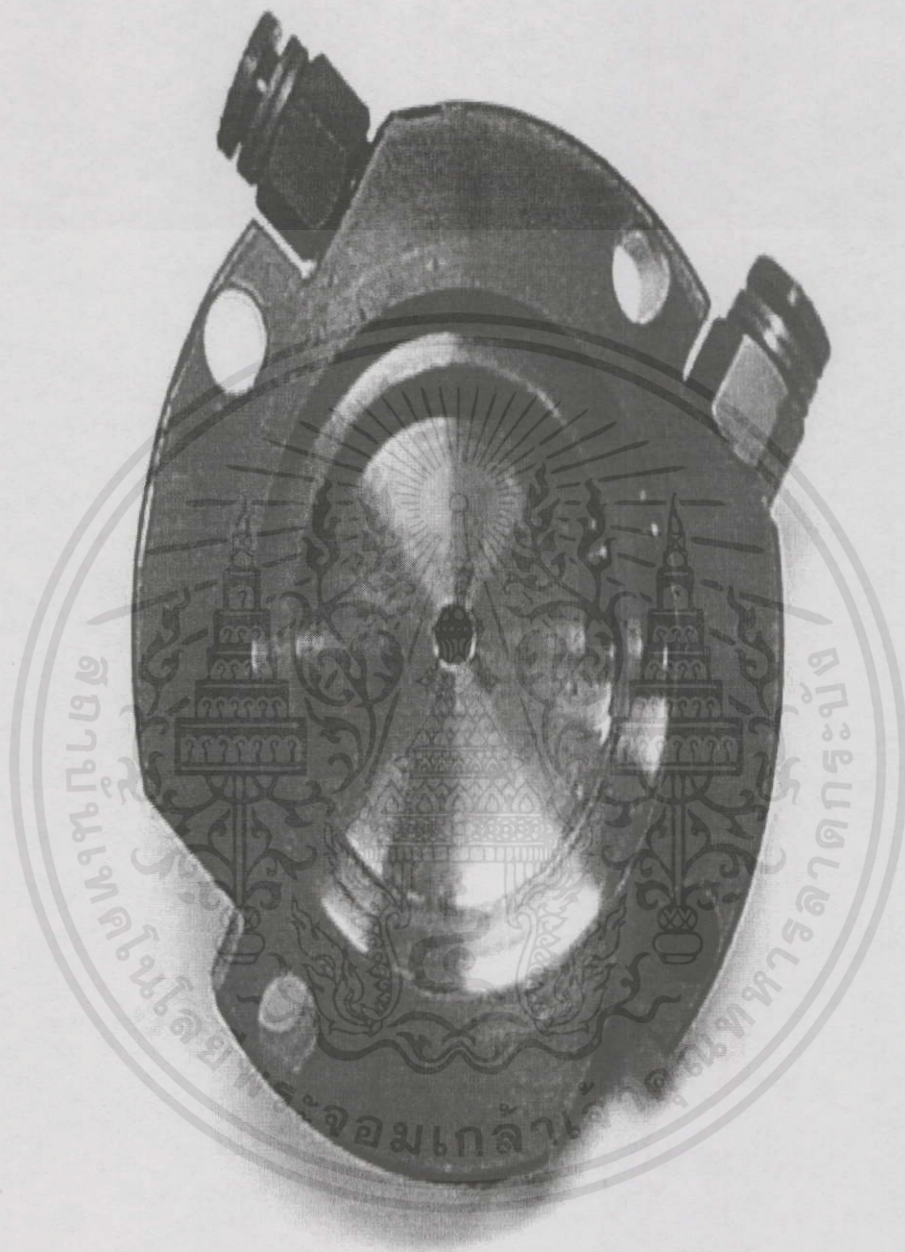


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
**รูปที่ 3.2** ท่ออุปกรณ์หล่อเย็น  
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



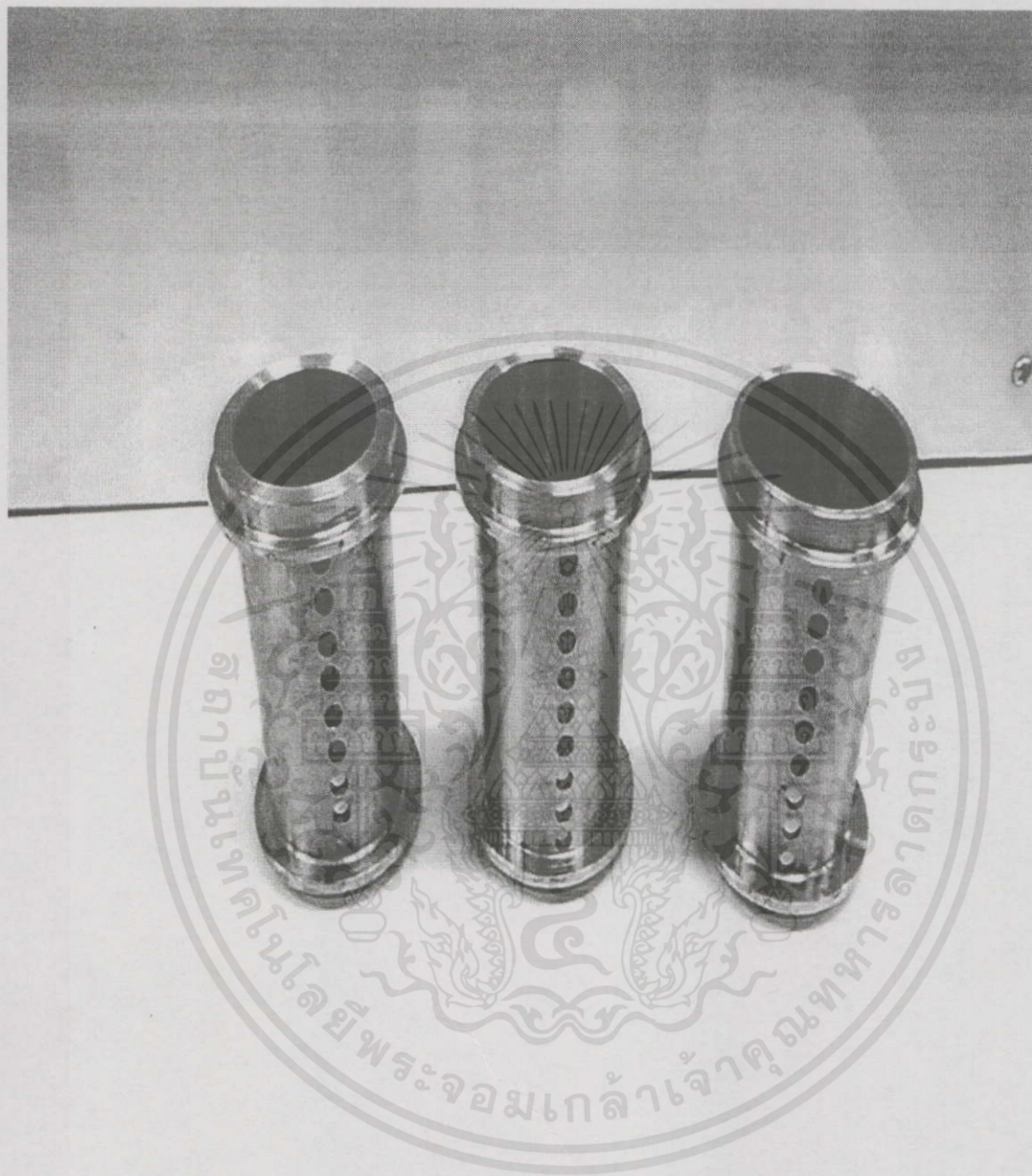
รูปที่ 3.3 ตัวปิดช่องวัดอุณหภูมิของท่อวอร์เทกซ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



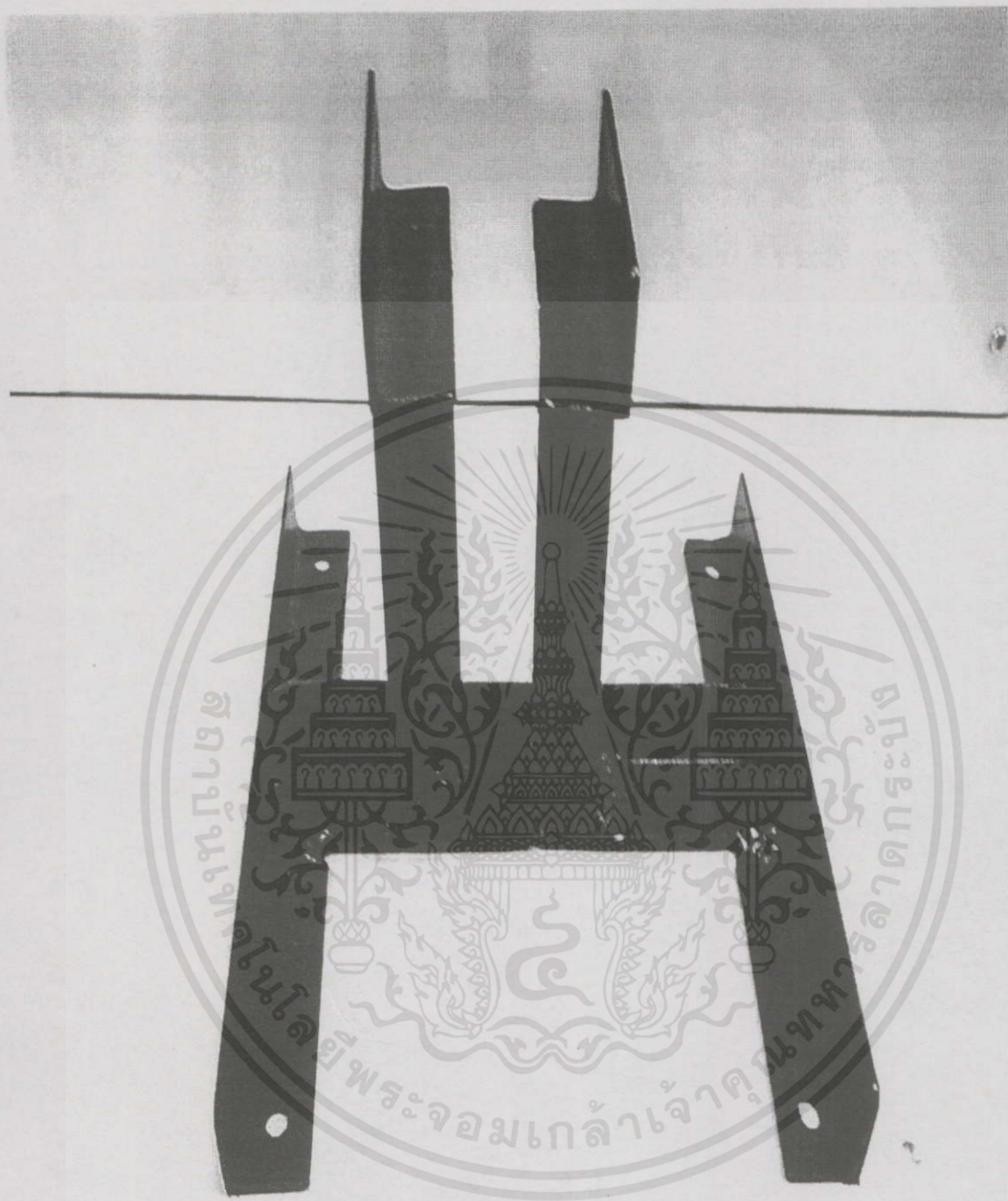
รูปที่ 3.4 หัวฉีดท่ออุปกรณ์หล่อเย็นแบบหมุนวน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



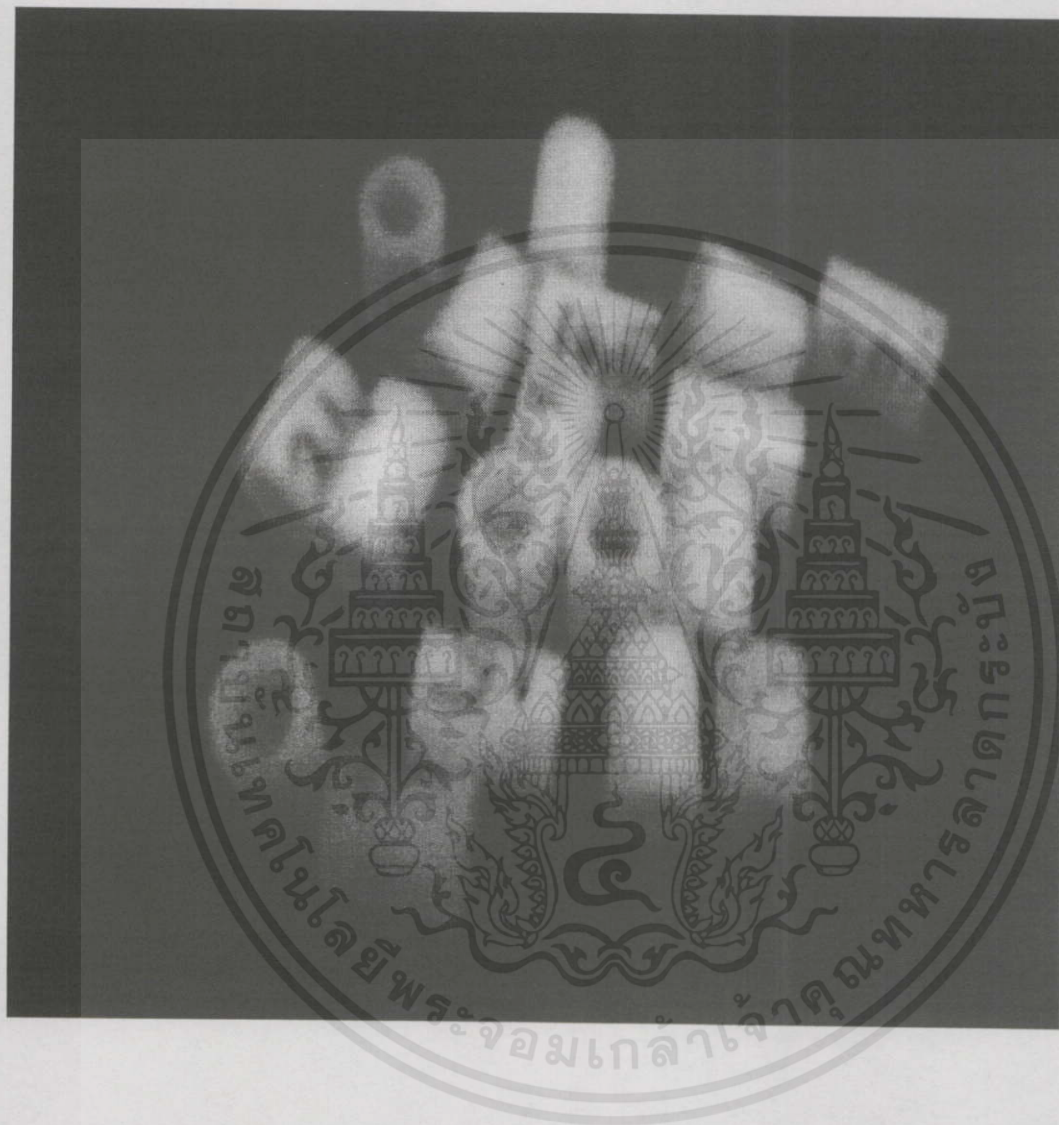
รูปที่ 3.5 ท่ออุปกรณ์หล่อเย็นแบบหมุนวนที่มีความเอียงมุมขนาดต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.6 แทนวางท่ออุปกรณ์หล่อเย็นแบบหมุนวน ขนาด 150x150x120 mm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.7 แหวนกันช่องกระจายอากาศของอุปกรณ์หล่อเย็นแบบหมุนวน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



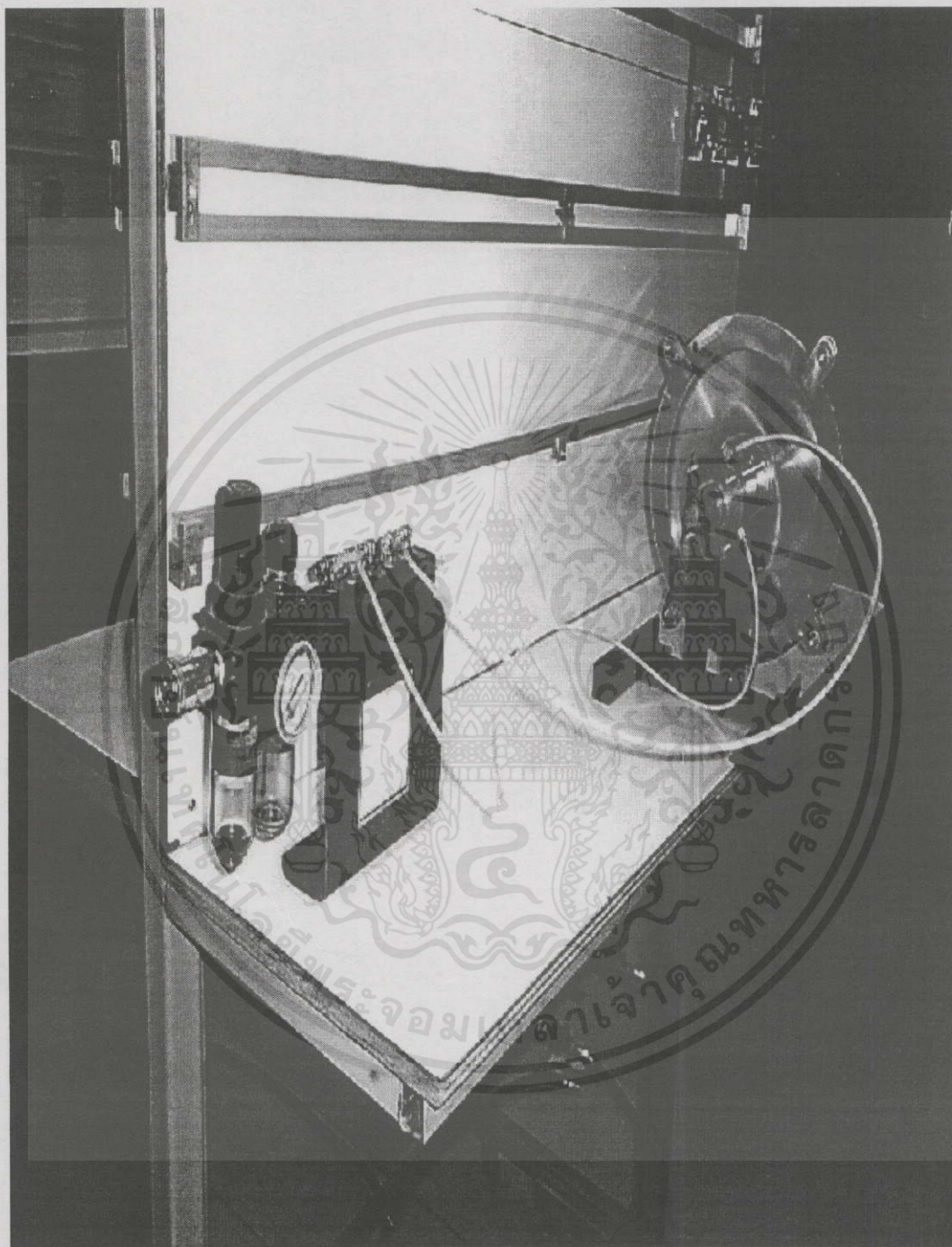
รูปที่ 3.8 ตัวแพร่กระจายอากาศ (Diffuser) ขนาด 250x9 mm ของอุปกรณ์หล่อเย็นแบบหมุนวน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.9 ตัวปิดกระจายอากาศ (End Plate) ขนาด 250x3 mm ของอุปกรณ์หล่อเย็นแบบหมุนวน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



### รูปที่ 3.10 ชุดทดลองอุปกรณ์หล่อเย็นแบบหมุนวน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 3.2 การเลือกอุปกรณ์ประกอบการทดลอง

### 3.2.1 เครื่องอัดลม (Air Compressor)

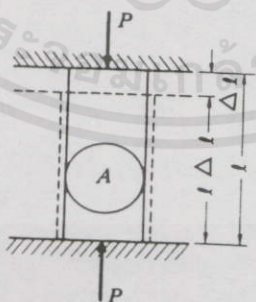
เครื่องอัดลมเป็นเครื่องที่เพิ่มความดันของอากาศหรือก๊าซ ความดันขาเข้าของเครื่องอัดลมส่วนมากจะเป็นความดันบรรยากาศ เครื่องที่ได้รับความดันขาเข้าสูงกว่าความดันบรรยากาศ เรียกว่า เครื่องเพิ่มความดัน (Booster) และเครื่องที่ดูดก๊าซ ที่ความดันต่ำกว่าบรรยากาศ เรียกว่า เครื่องดูด (Vacuum)

โรงงานอุตสาหกรรมส่วนมากไม่ว่าจะเป็น โรงงานประกอบรถยนต์, โรงงานทอผ้า, โรงงานอิเล็กทรอนิกส์ ฯลฯ จะใช้ลม (Compressed Air) เป็นส่วนหนึ่งในระบบควบคุมจึงทำให้การเลือกเครื่องอัดลมและการเดินท่อลม จะต้องเลือกและติดตั้งอย่างถูกต้องตามหลักวิชาการ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพและลดต้นทุนในการผลิต

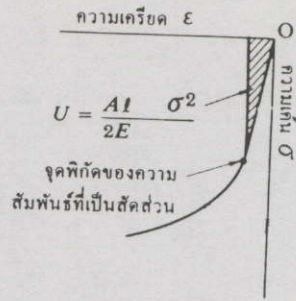
โดยปกติโรงงานทั่วไปเครื่องอัดลม จะใช้พลังงานไฟฟ้าประมาณ 5-10 เฮอร์เซ็นต์ ของพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในโรงงานอุตสาหกรรมทั้งหมด ซึ่งถ้าเรานำ เครื่องอัดลมนำมาใช้ประโยชน์ในงานทำความเย็นเราสามารถประหยัดพลังงานได้มากขึ้น

#### 3.2.1.1 หลักการของเครื่องอัดลม

ตามปกติอากาศจะถูกอัดลมให้ความดันสูงสุดถูกส่งไปเก็บในถังเพื่อใช้งานตามความต้องการแต่ของแข็งถูกอัดลมได้เหมือนกัน



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
**รูปที่ 3.11 การอัดของแข็ง**  
 ไม่ว่าจะพิมพ์กี่ครั้งก็ไม่มีให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.12 พลังงานเนื่องจากยืดหยุ่น

แสดงรูปที่ 3.11 ท่อของแข็งมีพื้นที่หน้าตัด “I” ถัดลง  $\Delta l$  เนื่องจากถูกอัดลมน ความเค้นอัดลมน และความเครียดอัดลมนจะเป็นดังนี้

$$\text{ความเค้นอัดลมน} \quad \sigma = \frac{P}{A} \quad (3.1)$$

$$\text{ความเครียดอัดลมน} \quad \varepsilon = \frac{\Delta l}{l} \quad (3.2)$$

แสดงรูปที่ 3.12 จะเป็นความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียด  $\sigma$  เป็นสัดส่วนกับ  $\varepsilon$  จนกระทั่ง  $\varepsilon$  ค่าถึงระดับหนึ่ง ความสัมพันธ์นี้แสดงด้วยสมการ

$$\sigma = E\varepsilon \quad (3.3)$$

E เป็นโมดูลัสของความยืดหยุ่น และพลังงาน U ที่อยู่ในท่อของแข็ง คืองานที่กระทำโดยแรง P

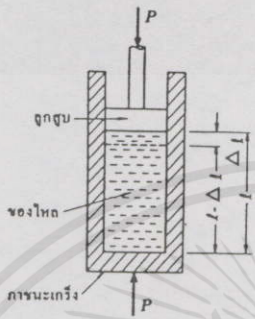
$$U = \frac{1}{2} P \cdot \Delta l = \frac{1}{2} \sigma A \cdot \varepsilon l = \frac{AI \sigma^2}{2 E} \quad (3.4)$$

ดังนั้นของแข็งถูกอัดลมนได้และสามารถที่จะเก็บพลังงานไว้ได้ ตัวอย่างที่เห็นได้ชัดเจนคือสปริง แต่ในกรณีของแข็งจะนำพลังงานนี้ไปยังที่ที่ต้องการใช้พลังงานได้ยาก

จะได้กล่าวถึงกรณีของไหลถูกอัดลมน ของไหลอาจแบ่งออกเป็นของเหลวและก๊าซ และทั้งสองอย่างเข้าไปอยู่ในสถานะรูปร่างอะไรก็ได้ ของเหลวมีผิวที่แปรเปลี่ยนได้ ส่วนก๊าซไม่มีผิวแต่จะแพร่ (Diffuse) เข้าสู่รูปร่างของภาชนะบรรจุตามหลักการ Pascal ความดันที่กระทำกับส่วนใดของของไหลที่อยู่ในสถานะปิดจะทำให้เกิดความดันนั้นโดยทั่วไป และในทุกทิศทางซ้บแต่ในกรณีไม่ว่าของแข็งในรูปที่ 3.12 จะต่างจากของไหล ความเค้น  $\sigma$  จะเกิดขึ้นเฉพาะในทิศทาง  $\sigma$  ของแรง P ใช้ ส่วนความเค้นในทิศทางอื่นจะต่ำกว่า  $\sigma$

จะวิเคราะห์ของไหลที่บรรจุอยู่ในภาชนะเกร็ง (Rigid) ซึ่งมีพื้นที่หน้าตัด  $A$  และความลึก  $l$  ดังในรูปที่ 3.13 และของไหลนี้ถูกอัดลมด้วยลูกสูบโดยแรง  $P$  ความดันในของไหลจะเป็นไปตามสมการ

$$P = \frac{P}{A} \tag{3.5}$$



รูปที่ 3.13 การอัดของไหล

ความดันนี้จะแพร่ไปทั่วทุกจุดในกระบอก ทำให้ความดันเท่ากันทุกจุด ถ้าของไหลซึ่งมีปริมาตรเดิม  $V$  ถูกอัดลมจนปริมาตรลดลง  $\Delta V$  ความเครียดเชิงปริมาตร  $\frac{\Delta V}{V}$  เป็นไปตามสมการ

$$P = K \frac{\Delta V}{V} = K \frac{\Delta l}{l} \tag{3.6}$$

$$\frac{\Delta V}{V} = \frac{\Delta l}{l} \text{ สำหรับการอัดลมในรูปที่ 3.13}$$

$K$  เป็นโมดูลัสเชิงปริมาตร (Bulk Modulus) และขึ้นกับประเภทสถานะของของไหล สำหรับของเหลวถือได้ว่า  $K$  มีค่าคงที่ สำหรับทุกความดัน ดังนั้นพลังงานที่อยู่ในของเหลวจะเป็นดังนี้

$$U = \frac{1}{2} P \cdot \Delta l = \frac{1}{2} \sigma AP \frac{lP}{K} = \frac{Al \sigma^2}{2 E} \tag{3.7}$$

สูตรข้างบน (3.7) คล้ายกับสมการ (3.1) ของของแข็งมาก

ถ้าของไหลเป็นก๊าซ โมดูลัสเชิงปริมาตร  $K$  จะเปลี่ยนค่าถ้าความดันเปลี่ยนและจากสมการ

$$P_1 V_1 = P_2 V_2 = \text{ค่าคงที่} \text{ ซึ่งจะกล่าวถึงต่อไป } K \text{ หาได้จากสมการ}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีกรนำไปใช้

$$K = \frac{dP}{\left(\frac{dp}{v}\right)} = k.p \quad (3.8)$$

สำหรับกรณีของรูปที่ 3.13  $k.p$  หาได้จาก

$$k.p = \frac{dP}{\left(\frac{dl}{l}\right)} \quad (3.9)$$

ดังนั้น

$$U = A \int p dl = A \int \frac{p dl}{k} = \frac{Al}{k} \int_{p_1}^{p_2} dp = \frac{Al}{k} \Delta p \quad (3.10)$$

จะเห็นว่า  $U$  ขึ้นกับ  $\Delta p$  ความแตกต่างระหว่างความดันก่อนและหลังการอัดลมและขึ้นกับอัตราส่วนของความร้อนจำเพาะ

ค่าของพลังงานที่เก็บอยู่ในของแข็ง ของเหลวและก๊าซซึ่งมีปริมาตรเท่ากับ  $(A \times l)$  มีอยู่ในตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 พลังงานที่เก็บไว้ได้โดยการอัด

	ของแข็ง : เหล็กเหนียวที่ผ่านการทำให้แข็ง		ของเหลว : น้ำ		ก๊าซ : อากาศ
สูตร	(1.1)		(1.3)		(1.5)
$\sigma$	$8 \times 10^4 \text{ kgf/m}^2$ { $780 \times 10^4 \text{ kPa}$ }	$p$	$8 \times 10^4 \text{ kgf/m}^2$ { $780 \times 10^4 \text{ kPa}$ }	$\Delta p$	$7 \times 10^4 \text{ kgf/m}^2$ { $690 \times 10^4 \text{ kPa}$ }
$E$	$2.1 \times 10^{10} \text{ kgf/m}^2$ { $206 \times 10^{10} \text{ kPa}$ }	$K$	$2.1 \times 10^8 \text{ kgf/m}^2$ { $206 \times 10^{10} \text{ kPa}$ }	$p_1$	$10^4 \text{ kgf/m}^2$ { $8 \times 10^4 \text{ kPa}$ }
$\sigma^2$	$1.5 \times 10^{-1} \text{ kgf/m}^2$	$\frac{p^2}{2K}$	$15 \text{ kgf/m}^2$	$p_2$	$8 \times 10^4 \text{ kgf/m}^2$ { $780 \times 10^4 \text{ kPa}$ }
$2E$	{ $14.7 \text{ kPa}$ }		{ $1470 \text{ kPa}$ }	$\kappa$	1.4
				$\frac{\Delta p}{\kappa}$	$5 \times 10^4 \text{ kgf/m}^2$ { $490 \times 10^4 \text{ kPa}$ }

เมื่อเปรียบเทียบ  $\sigma^2/2E$   $p^2/2K$  และ  $\Delta p/k$  ของตารางนี้จะเห็นว่าค่าของอากาศสูงกว่าของเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าอย่างอื่นมา

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น ผู้จัดทำหนังสือฉบับนี้ขอสงวนสิทธิ์ในเนื้อหาและข้อมูลอ้างอิงซึ่งเจ้าของเอกสารฉบับนี้มีการนำไปใช้

ดังนั้นก๊าซจะเก็บพลังงานได้มากต่อหน่วยปริมาตร เมื่อความดันเพิ่มขึ้นถ้ามีพลังงานเก็บอยู่

ในภาชนะจะสามารถจ่ายพลังงานไปได้ตามท่อ แต่ก็มีความหวังหลายประการเกี่ยวกับการอัดลม

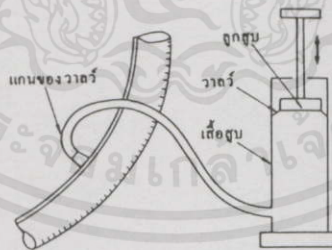
และจ่ายก๊าซ เนื่องจากอุณหภูมิก๊าซจะสูงขึ้นเมื่อถูกอัดลม อุณหภูมิจะลดลงมากเมื่อปล่อยพลังงานออกไป และก๊าซรั่วได้ง่าย

เราจะกล่าวถึงหลักการทำงานของเครื่องอัดลมอากาศที่อัดลมและเก็บอากาศ ถ้าก๊าซถูกใส่และปิดไว้ในภาชนะแล้วปริมาตรลดลงก๊าซจะถูกอัดลม เครื่องชนิดนี้เรียกว่า เครื่องอัดลมลดปริมาตร (Displacement Type) ถ้าพัฒนาการอัดลมรูปที่ 3.13 ต่อไปจะได้เครื่องอัดลม ลดปริมาตรที่ดีขึ้น

ซึ่งมีลูกสูบวิ่งกลับเป็นจังหวะ ทำให้เกิดการดูดอัดลมและส่งก๊าซออก สำหรับเครื่องอัดลมนี้ส่วนที่เสียดสีกันระหว่างลูกสูบ และเสื่อสูบจะต้องไม่ปล่อยให้อากาศรั่วหรือมีการติดขัดของลูกสูบและเสื่อสูบ หน้าที่ที่ยากนี้เป็นของ แหวนลูกสูบเครื่องอัดลมประเภทนี้ซับซ้อนน้อย และใช้กันมากคือเครื่องสูบลมจักรยานในรูปที่ 3.14 และ รูปที่ 3.15



รูปที่ 3.14 เครื่องสูบลมจักรยาน



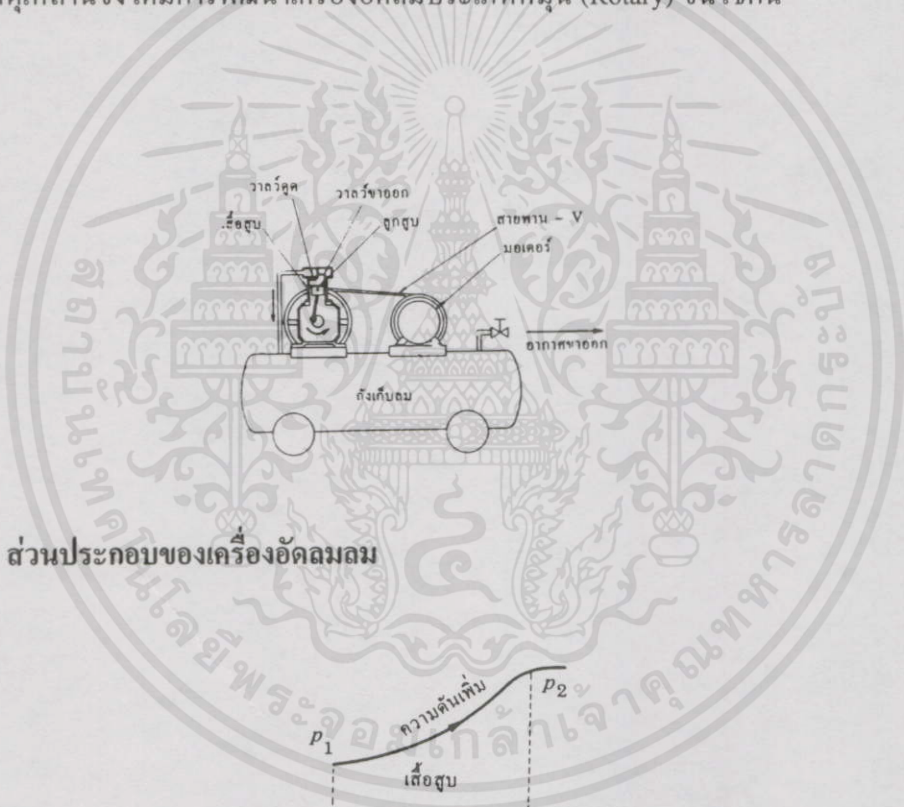
รูปที่ 3.15 หลักการทำงานของเครื่องอัดลมซึ่งคล้ายกับของเครื่องสูบลม

หลักการของเครื่องสูบลมจักรยานเหมือนกับของเครื่องอัดลมทุกประการ จะได้กล่าวถึงการ  
 เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 หลักการทำงานของเครื่องสูบลมจักรยาน โดยใช้รูปที่ 3.15 ประกอบเมื่อลูกสูบถูกยกขึ้น ภายในเสื่อสูบ  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีกาเข้าไปใช้  
 จะเกิดความดันต่ำกว่าบรรยากาศและอากาศจะเข้าสู่กระบอกสูบผ่านวาล์วดูด เมื่อลูกสูบเลื่อนลง

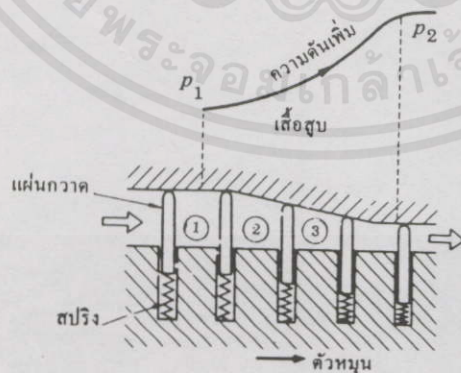
วาล์วจะถูกปิดด้วยด้วยแรงดันอากาศและปริมาตรของอากาศจะลด ดังนั้นความดันอากาศในกระบอกสูบจะสูงขึ้นจนกว่าความดันในขางจักรยานค่อยๆเพิ่ม

หลักการของเครื่องอัดลมก็เหมือนกันเครื่องสูบลูกสูบขึ้นลงด้วยมือจะมีมอเตอร์ขับเคลื่อนลูกสูบให้เคลื่อนที่ไปกลับผ่านข้อเหวี่ยง และอัดลมอากาศในเสื่อสูบดังในรูปที่ 3.16 ในกรณีนี้วาล์วของเครื่องสูบลูกสูบข้างรถจักรยานกลายเป็นวาล์วคูคของเครื่องอัดลมและวาล์วที่ขางจักรยานกลายเป็นวาล์วขาออกและขางจักรยานกลายเป็นถังเก็บลมของเครื่องอัดลม เครื่องอัดลมประเภทที่มีลูกสูบเคลื่อนที่ไปกลับ เรียกว่าเครื่องอัดลมประเภทลูกสูบหรือเครื่องอัดลมไปกลับ

เครื่องอัดลมประเภทลูกสูบทำให้เกิดการสันเสทือนเนื่องจากแรงเสียด ดังนั้นจึงไม่เหมาะที่จะใช้ที่ความเร็วสูง นอกจากนั้นการไหลของก๊าซจะไม่เรียบมีการเปลี่ยนแปลงเป็นจังหวะ ด้วยเนื่องจากเหตุเหล่านี้จึงได้มีการพัฒนาเครื่องอัดลมประเภทหมุน (Rotary) ขึ้นใช้กัน



รูปที่ 3.16 ส่วนประกอบของเครื่องอัดลม



รูปที่ 3.17 มีกรอัดลมภายใน (ชนิดแผ่นกวาดหรือเกลียว)

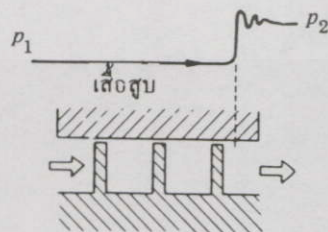
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่มอบไว้สำหรับครูในวงเพื่อเตรียมงานเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังแสดงในรูปที่ 3.17 ถ้ามีแผ่นหลายแผ่นสอดอยู่ในร่องของตัวหมุน (Rotor) และถ้าตัวหมุนนี้เคลื่อนที่ไปทางขวาแผ่นเหล่านี้จะถูกอัดลมนิดกับกระบอกสูบ โดยสปริง ก๊าซในช่องที่ ①, ② และ ③ จะถูกอัดลมนั้นขณะที่ก๊าซเคลื่อนที่ไปทางขวา ในทางตรงกันข้ามถ้าตัวหมุนเคลื่อนที่ไปทางซ้ายจะขยายตัว หลักการดังกล่าวนี้เป็นหลักการทำงานของเครื่องอัดลมประเภทแผ่นกวาด (Sliding Vane) ในกรณีขยับเข้าออกทำหน้าที่แทนลูกสูบ เครื่องอัดลมประเภทหมุนเช่นนี้ใช้กันประมาณ 50 ปีมาแล้ว เครื่องอัดลมประเภทนี้มีการสั่นสะเทือนน้อยเพราะน้ำหนักของแผ่นน้อยกว่าของลูกสูบ และเนื่องจากลักษณะการทำงานของเครื่องอัดลมจึงไม่จำเป็นต้องมีวาล์วและการไหลก๊าซจะเรียบ แต่เครื่องอัดลมประเภทนี้มีปัญหา เช่น การสูญเสียเนื่องจากความฝืดของแผ่น การสึกหรอและการรั่วจากด้านข้างของแผ่น นอกจากนี้ยังมีข้อเสียคือประสิทธิภาพจะต่ำถ้าความดันที่ต้องการใช้งานไม่สัมพันธ์กับอัตราส่วนการอัดลมของเครื่องอัดลม ทั้งนี้เพราะก๊าซจะถูกอัดลมถึงความดันหนึ่งแล้วปล่อยออกไปไม่ว่าความดันใช้งานจะเป็นเท่าใด

เครื่องอัดลมประเภทหมุนอีกชนิดหนึ่ง คือเครื่องอัดลมประเภทเกลียว เครื่องอัดลมนี้มีแต่รอกเส้นและตัวหมุนตัวผู้และตัวเมียทำหน้าที่อัดลมก๊าซและมีเฟืองกำกับความสัมพันธ์ของตัวหมุนทั้งสอง ดังนั้นเหมาะที่จะใช้ความเร็วสูง ในกรณีนี้ความดันไม่ตกเนื่องมาจากการรั่วผ่านช่องว่างระหว่างตัวหมุนและเสื้อ (Casing) และจะใช้งานได้ทนทาน

ความดันสูงสุดที่รับได้สำหรับเครื่องอัดลมอากาศนี้ขึ้นอยู่กับการตัดโค้งของตัวหมุน ความดันสูงสุดจะเท่ากับประมาณ  $30 \text{ kgf/cm}^2$  (2,900 kPa)

วิธีการอัดลมก๊าซถูกเคลื่อนไปโดยลูกสูบที่มีรูปร่างซับซ้อน (Labyrinth) แต่ประกอบด้วยแผ่นที่ความสูงคงที่ดังในรูปที่ 3.18 เป็นหลักการทำงานของเครื่องอัดลมหรือเครื่องเป่า (Roots) หรือ Roots Blower กรณีนี้เนื่องจากการอัดลมภายในเครื่อง การแปรเปลี่ยนของความดันตลอดจนเสียงจะมีมากกว่าเครื่องอัดลมประเภทแผ่นกวาดและสมรรถนะจะตกลงเร็วถ้าความดันขาออกสูงกว่าความดันขาเข้ามาก เครื่องอัดลมประเภทนี้มักใช้งานที่ความดัน (Gauge) ต่ำกว่า 6,000 Aq (60kPa)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษานี้เท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 3.18 ไม่มีการอัดลมภายใน (ชนิด Roots)

3.2.1.2 การจำแนกประเภทของเครื่องอัดลม

เครื่องอัดลมมีมากมายหลายชนิด การที่จะเลือกใช้ชนิดใดขึ้นอยู่กับปริมาณและความความดันที่ต้องการรูปที่ 3.19 แสดงการจำแนกประเภทของเครื่องอัดลม โดยความดัน ความดันแบ่งออกเป็น 3 ช่วง ความดันน้อยคือพัดลมความดันปานกลางคือเครื่องเป่าและความดันสูงคือเครื่องอัดลม เครื่องอัดลมยังแบ่งออกเป็นประเภทเหวี่ยง (Turbo) และประเภทลดปริมาตร (Displacement) ประเภทเหวี่ยงนั้นให้ความเร็วและความดันของก๊าซโดยแรงเหวี่ยงซึ่งเกิดจากใบพัด ประเภทลดปริมาตรนั้นเพิ่มความดันของก๊าซด้วยการลดปริมาตร โดยการใช้ลูกสูบหรือแผ่นกวาด

ชื่อ	พัดลมและเครื่องเป่า		เครื่องอัด
	พัดลม	เครื่องเป่า	
ประเภท	ความดันต่ำกว่า 1000 mmAq {9800Pa}	1~10m Aq {9800Pa~98kPa}	สูงกว่า 1kg/cm <sup>2</sup> {98kPa}
ประเภทเหวี่ยง	ประเภทแนวแกนแนวแกน		
	พัดลมใบพัด		
	ประเภทแนวเหวี่ยง		
	ใบพัดตรง		
ประเภทกวาด	ใบพัดโค้ง		
	Roots		
	ชนิดหมุนแผ่นกวาด		
	เกลียว		
ชนิดลูกสูบ			

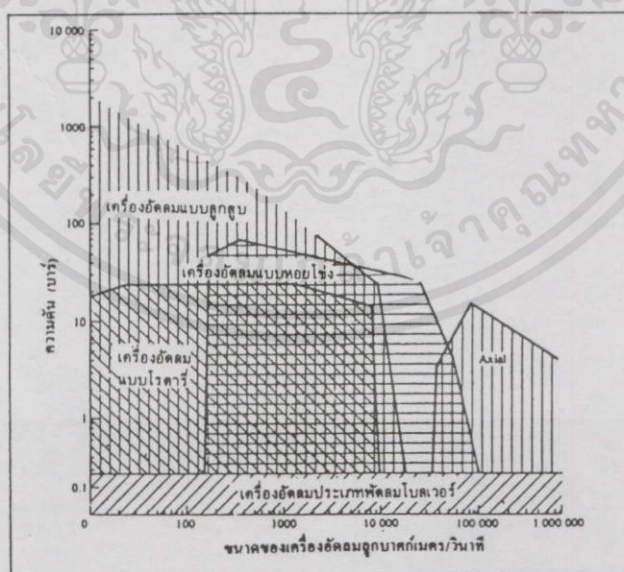
รูปที่ 3.19 การจำแนกประเภทของเครื่องอัดลม เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ในการเรียนการสอนเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เครื่องอัดลมประเภทลดปริมาตรยังแบ่งออกเป็นชนิดหมุนและชนิดกลับ และชนิดหมุนยังแบ่งออกเป็นชนิดสองลอน (Two-Lobe) ชนิดแผ่นกวาดและชนิดเกลียว

เครื่องอัดยังแบ่งออกได้ตามรูปลักษณะและวิธีการทำงานได้ดังนี้

1. การจำแนกจำนวนตอนของการอัดเช่น หนึ่งตอน สองตอน เป็นต้น
2. การจำแนกโดยวิธีการอัด: อัดด้านเดียว (Single Acting) และอัดสองด้าน (Double-Acting)
3. การจำแนกโดยการจัดเสื่อสูบ: แบบราบ, แบบตั้ง, แบบ L, แบบ V, แบบ W, แบบดาว และแบบสมดุคย์หันหน้าชนกัน
4. การจำแนกโดยการหล่อเย็น: การหล่อด้วยน้ำ และการหล่อเย็นด้วยอากาศ
5. การจำแนกโดยการหล่อเย็น: ชนิดขับตรง ชนิดสายพาน V และชนิดขับด้วยเฟือง
6. การจำแนกโดยวิธีการติดตั้ง: ชนิดตั้งอยู่กับที่ ชนิดเคลื่อนที่ได้
7. การจำแนกโดยวิธีการหล่อลิ้น: ชนิดหล่อลิ้นด้วยน้ำมัน ชนิดไม่ใช้น้ำมัน

การเลือกเครื่องอัดลมนอกเหนือจากการจำแนกประเภทดังกล่าวข้างต้นแล้ว การเลือกให้เหมาะสมกับการใช้งานแต่ละประเภทในระบบการผลิตจะต้องพิจารณาถึงความต้องความดันลมที่ ต้องการดังแสดงในรูปที่ 3.20



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น สิ่งนี้สงวนไว้สำหรับเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

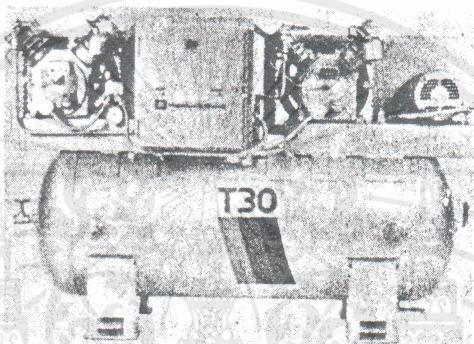
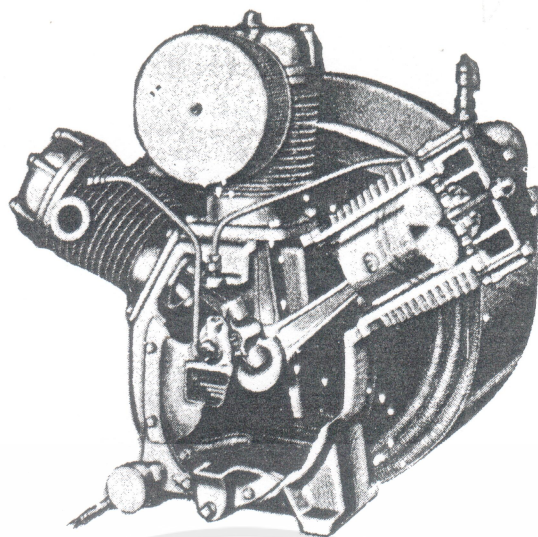
รูปที่ 3.20 แสดงเครื่องอัดลมชนิดต่างๆ และการเลือก

จากรูปที่ 3.20 แสดงให้เห็นว่ามีชนิดของเครื่องอัดลมชนิดที่จำหน่ายในท้องตลาด โดยในตารางที่ 3.3 จะอธิบายถึงข้อมูลทางเทคนิค และการใช้งานของเครื่องอัดลมแต่ละชนิด ซึ่งเป็นข้อมูลทั่วไปเท่านั้น การติดต่อกับบริษัทผู้ผลิตหรือตัวแทนจำหน่ายโดยตรงจะใช้ข้อมูลที่ละเอียด และการเลือกชนิดของเครื่องอัดลมจะต้องถูกต้องและเหมาะสมมากยิ่งขึ้น

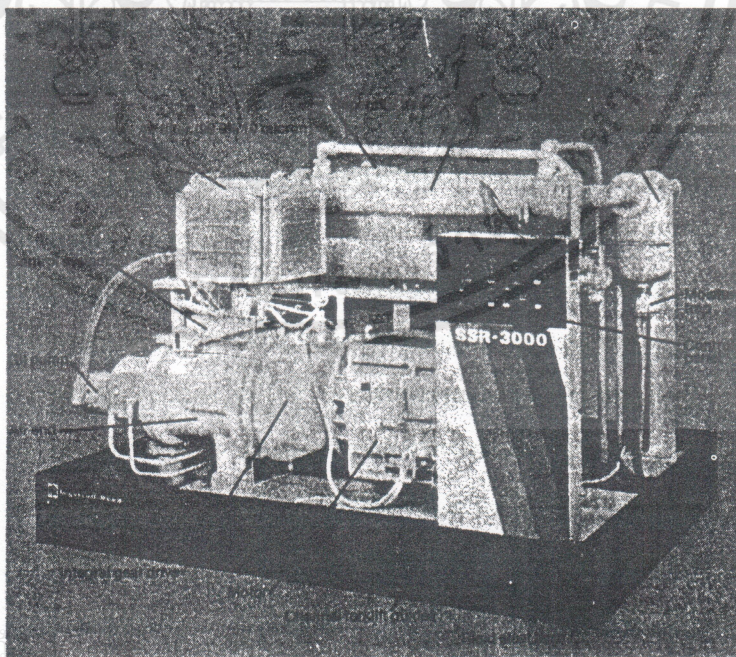
ตารางที่ 3.3 ข้อมูลทางด้านเทคนิคและการใช้งานของเครื่องอัดลม

ชนิดของเครื่องอัดลม	ข้อมูลทางเทคนิคและการใช้งาน
ประเภทพัดลมโบลเวอร์ (blower)	ไม่ได้อยู่ในขอบเขตของบทความนี้ แต่โดยทั่วไปใช้เมื่อต้องการลมที่มีปริมาณมาก ๆ แต่ความดันต่ำ ปกติใช้กับระบบกำจัดน้ำเสีย และระบบส่งสายพาน (Pneumatic conveyor system)
แบบโรตารี (rotary)	การอัดลมเกิดขึ้นจากการหมุนของโรเตอร์ (rotor) 2 ชิ้น ขบกันในแนวเส้นรอบวง โดยจะเกิดแรงเหวี่ยง (centrifugal force) อัดลมในช่องอัด (compression chamber) ทำให้ระบบการหล่อลื่นของเครื่องอัดลมชนิดนี้จะต้องดี เพื่อลดการสึกกร่อนของโรเตอร์ นอกจากนี้การเพิ่มความดันของลมก็สามารถทำได้โดยการเพิ่มสเตจ (stage) ของเครื่องอัดลม
แบบหอยโข่ง (centrifugal)	เครื่องอัดลมชนิดนี้ทำงานโดยการหมุนของใบพัด (impeller) ทำให้เกิดแรงเหวี่ยง ซึ่งจะเหมาะสมสำหรับปริมาณลมที่มาก ๆ เครื่องอัดลมแบบนี้มีการสึกกร่อนของใบพัดน้อย รวมทั้งจะมีละอองน้ำมันไปกับลมน้อยมาก จึงเหมาะสำหรับระบบที่ต้องการลมที่สะอาดปราศจากน้ำมัน (oil free)
แบบลูกสูบ (reciprocating)	เป็นแบบ positive displacement การอัดลมเกิดขึ้นจากการทำงานของลูกสูบเคลื่อนขึ้นเคลื่อนลงในกระบอกสูบ เครื่องอัดลมแบบนี้เป็นเครื่องอัดลมที่เกิดขึ้นก่อนที่จะพัฒนาเป็นแบบโรตารีหรือแบบหอยโข่ง การสึกหรอของเครื่องจักร, ค่าบำรุงรักษา และความสิ้นเปลืองของเครื่องอัดลมแบบนี้ค่อนข้างสูง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาดูงานนี้ เป็นส่วนตัวเห็นว่าเป็นประโยชน์  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



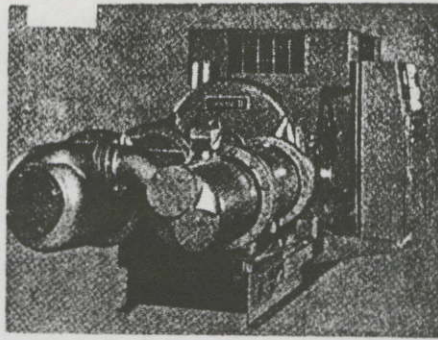
รูปที่ 3.21 เครื่องอัดลมแบบลูกสูบ



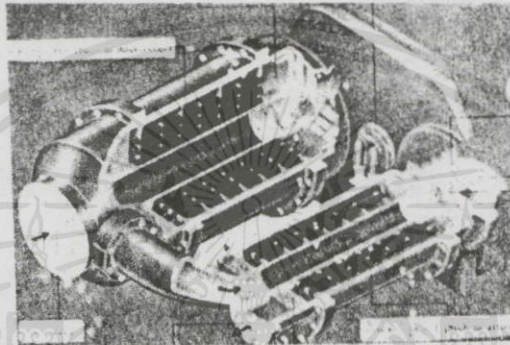
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ โฆษณาด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

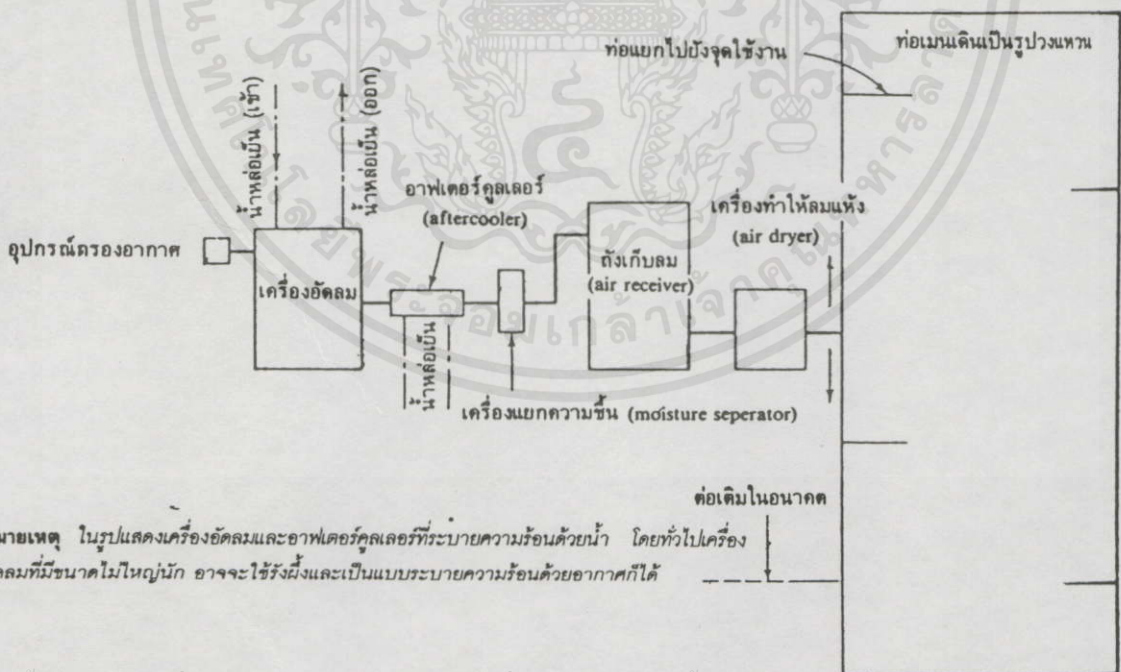
รูปที่ 3.22 เครื่องอัดลมแบบโรตารีสกรู



รูปที่ 3.23 เครื่องอัดลมแบบหอยโข่ง



รูปที่ 3.24 เครื่องอัดลมแบบแรงเหวี่ยงขนาดใหญ่



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
**รูปที่ 3.25** ไดอะแกรมการติดตั้งเครื่องอัดลมและส่วนประกอบ  
 ไม่ว่าจะพิมพ์ใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.2.1.3 ระบบการส่งจ่ายลมอัด (Compressed Air System)

จากรูปที่ 3.25 เป็น ไดอะแกรมแสดงรายละเอียดการติดตั้งเครื่องอัดลมและส่วนประกอบอย่างง่าย ๆ ซึ่งจะต้องเพิ่มหรือลดอุปกรณ์บางอย่างในกรณีที่ต้องการลมที่มีคุณภาพสูงหรือต่ำกว่านี้

สิ่งที่จำเป็นในการออกแบบและติดตั้งคือปริมาณลมและความดันที่ถูกต้องกับความต้องการใช้งาน นอกจากนี้ยังต้องคำนึงถึงปริมาณน้ำในลม โดยเฉพาะในระบบควบคุมด้วยลม ซึ่งต้องการลมที่แห้งและสะอาดอยู่เสมอ เนื่องจากความชื้นในบรรยากาศ การจำกัดน้ำออกจากระบบทำให้ผ่านเข้าไปยังอากาศเดอริคูเลเตอร์ (After Cooler), เครื่องแยกความชื้น (Moisture Separator) หรือเครื่องทำให้ลมแห้ง (Air Dryer) สำหรับอุปกรณ์ประกอบต่างๆ จะได้อธิบายโดยละเอียดดังต่อไปนี้

อากาศเดอริคูเลเตอร์ (After Cooler) การติดตั้งอากาศเดอริคูเลเตอร์นี้จะติดตั้งแยกออกจากเครื่องอัดลมหรือประกอบติดอยู่กับเครื่องอัดลม (Packaged Unit) ซึ่งการทำงานของเครื่องนี้จะเหมือนกันไม่ว่าจะติดตั้งแบบใด วัตถุประสงค์ของอากาศเดอริคูเลเตอร์คือต้องการแยกน้ำออกจากลมเพื่อให้ลมที่ออกมาแห้งขึ้น สำหรับเครื่องอัดลมที่มีหลายสเตจ จะต้องมีอินเตอร์คูเลเตอร์ (Intercooler) เพื่อกำจัดน้ำออกจากลมก่อนที่จะเข้าไปในสเตจต่อไปนี้

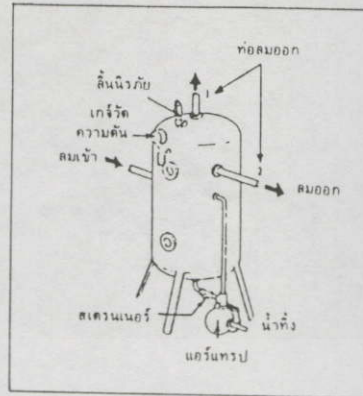
หลักการการทำงานของอากาศเดอริคูเลเตอร์คือการใช้น้ำไปลดอุณหภูมิของลมโดยผ่านเข้าไปในอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน (Heat Exchanger) ซึ่งการติดตั้งอุปกรณ์นี้จะต้องมีข้อดีคือ

1. ช่วยลดปริมาณไอน้ำในท่อซึ่งเป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดการกัดกร่อนของท่อ
2. ทำให้เกิดการสูญเสียความดัน (Friction Loss) ในท่อลดลง
3. สำหรับพวกเครื่องมืออัดลม (Air Tool) การมีน้ำในลมจะทำให้ประสิทธิภาพของการหล่อเย็นลดลง และทำให้เครื่องมือเสื่อมสภาพเร็วขึ้น

โดยปกติอากาศเดอริคูเลเตอร์จะกำจัดปริมาณน้ำในลมได้ประมาณ 70-80 เปอร์เซ็นต์ของปริมาณของปริมาณลมทั้งหมด แต่ถ้าใช้อากาศเดอริคูเลเตอร์ชนิดที่ระบายความร้อนด้วยอากาศก็อาจกำจัดได้น้อยกว่านี้

ถังเก็บลม ถังเก็บลมปกติจะทำด้วยถังเหล็กแบบรับแรงดัน (Pressure Vessel) ซึ่งมีหน้าที่ในการเก็บลม เพื่อรักษาความดันลมของระบบให้คงที่อยู่ตลอดเวลา นอกจากนี้ยังช่วยลดปริมาณน้ำในระบบได้อีกด้วย ถังเก็บลมจะต้องจะประกอบด้วยเกจวัดความดัน (Pressure Gauge) ถิ่นนิรภัย (Safety Valve) แอร์แทรป (Air trap) ดังรูปที่ 3.26

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.26 รายละเอียดการติดตั้งถังเก็บลม

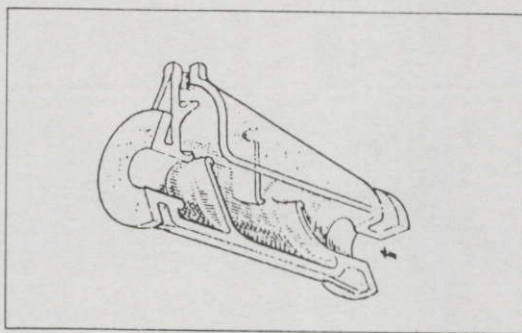
ขนาดของถังเก็บลมจะเป็นไปตามคำแนะนำของผู้ผลิตเพราะต้องออกแบบให้สอดคล้องกับการทำงานของเครื่องอัดลม นอกจากนี้ยังต้องคำนึงถึงจุดแยกที่ต้องใช้ลมมากกว่าจุดอื่น ซึ่งอาจจะจำเป็นจะต้องติดตั้งถังเก็บลมเพิ่มสำหรับจุดที่มีการใช้ลมในปริมาณมากๆ เพื่อไม่มีผลกระทบต่อความดันลมของระบบ

เครื่องทำให้ลมแห้ง เครื่องทำให้ลมแห้งหรือที่เรียกว่าแอร์ครายเออร์ (Air Dryer) เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ลดปริมาณน้ำในลมหลังจากอากาศเข้าสู่เครื่อง เพื่อลดปริมาณน้ำในลมให้ต่ำลงไปอีกตามที่ต้องการ

แอร์ครายเออร์จะมี แบบที่นิยมใช้กันคือ Refrigerant Air Dryers, Adsorption Dryers และ Absorption Dryer โดยทั่วไปแอร์ครายเออร์จะมีติดตั้งสำหรับลมที่ใช้ในการควบคุม, พ่นสีรถยนต์, โรงงานอิเล็กทรอนิกส์ เป็นต้น การเลือกขนาดและชนิดของแอร์ครายเออร์ขึ้นอยู่กับปริมาณและคุณภาพของลมที่ต้องการ โดยปกติ Refrigerant Air Dryer จะสามารถลดปริมาณน้ำในลมจนถึงที่จุดน้ำค้าง (Dew Point) ประมาณ  $2^{\circ}\text{C}$  ถ้าต้องการจุดน้ำค้างที่ต่ำกว่านี้ต้องใช้แบบ Adsorption หรือ Adsorption Dryer ซึ่งจะทำได้จุดน้ำค้างต่ำลงถึง  $-40^{\circ}\text{C}$  หรือต่ำกว่า

เครื่องแยกความชื้น (น้ำ) เครื่องแยกน้ำ (Water Separator) จะติดตั้งระหว่างอากาศเข้าสู่เครื่องและถังเก็บลม ดังแสดงในรูปที่ 3.27 วัตถุประสงค์ของอุปกรณ์นี้คือทำให้น้ำแยกออกจากลม หลังจากนั้นก็ทำการระบายน้ำออกจากระบบได้ หลักการทำงานคือลดความเร็วลมในระบบ โดยมีแผ่นกั้นเพื่อให้ระยะเวลาเก็บ (Detention Time) ของลมในเครื่องแยกน้ำนานขึ้น จนน้ำสามารถแยกออกจากระบบได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



### รูปที่ 3.27 รายละเอียดของเครื่องแยกความชื้น (Water Separator)

#### 3.2.1.4 ข้อแนะนำในการติดตั้งเครื่องอัดลม

1. ตำแหน่งที่ติดตั้งเครื่องอัดลมที่จะใกล้ที่สุดที่ต้องการ ถ้าอุปกรณ์ที่ต้องการใช้อากาศอัดกระจายกันอยู่ เครื่องอัดลมควรอยู่ตรงกลางเพื่อลดความต้านทานในท่อการรั่ว และเพื่อการประหยัด

2. ต้องไม่มีก๊าซที่ระเบิดหรือติดไฟได้อยู่ใกล้ ต้องใช้ความระมัดระวังเป็นพิเศษเพราะถ้าก๊าซอันตราย ถูกดูดเข้าไปในเครื่องอัดก็อาจจะเกิดปฏิกิริยาทางเคมีหรือเกิดไฟไหม้นอกจากนี้สิ่งของที่ติดไฟได้ง่ายก็ไม่ควรอยู่ใกล้เครื่องอัด

3. การซ่อมบำรุงรักษาและการตรวจต้องทำได้ง่าย ถึงแม้เครื่องอัดจะเป็นแหล่งค้นกำลังที่สำคัญแต่ก็มักจะ ไปอยู่มุมห้องหรือที่ที่เข้าไปทำงานหรือตรวจได้ยาก ด้วยเหตุนี้การใส่น้ำมันหล่อลื่นทุกวันหรือเปลี่ยนน้ำทิ้งจึงมักไม่ได้ทำกัน ทำให้ชีวิตการใช้งานสั้นลงดังนั้นจะต้องมีที่ว่างมากพอและต้องเตรียมการไว้ให้สามารถซ่อมได้เร็วเมื่อสิ่งผิดปกติเกิดขึ้น

4. ห้องเครื่องอัดต้องสว่างกว้างและมีการถ่ายเทอากาศได้ดี เมื่อมีเครื่องอัดขนาดใหญ่อยู่ในห้อง ห้องนั้นต้องสว่าง กว้าง และมีการถ่ายเทอากาศดี การที่มีแสงสว่างเพียงพอทำให้ทราบถึงปัญหาเช่นการรั่วได้เร็วและการที่มีพื้นที่กว้างทำให้มีความปลอดภัย และดูแลซ่อมตลอดจนตรวจได้ง่าย การถ่ายเทอากาศได้ดีทำให้อันตรายนลดลงถ้าก๊าซที่ถูกอัดเป็นก๊าซที่เป็นพิษต่อร่างกาย นอกจากนั้นการถ่ายเทอากาศได้ดี ป้องกันไม่ได้อุณหภูมิสูงขึ้นอย่างผิดปกติ

5. อุณหภูมิห้องควรต่ำกว่า 40 °C และห้องควรถ่ายอากาศได้ดี การทำงานของเครื่องอัดจะทำให้เกิดความร้อน และทำให้ส่วนต่างๆของเครื่องอัดร้อน และถ้าอุณหภูมิห้องสูงอากาศที่ถูกดูดเข้าเครื่องอัดก็มีอุณหภูมิสูง และอุณหภูมิเครื่องอัดก็จะสูงผิดปกติทำให้อายุการใช้งานของเครื่องสั้นลง ในสภาวะตรงกันข้ามถ้าอุณหภูมิห้องต่ำกว่า 0 °C เช่นในฤดูหนาว ต้องมีการอุ่นเครื่องเสียก่อนการใช้งาน มิฉะนั้นอาจเกิดความเสียหายแก่เครื่อง เช่นในกรณีที่น่าหล่อเย็นแข็งตัว

6. ต้องติดตั้งภายในอาคาร เครื่องอัดต้องอยู่ภายในอาคารเนื่องจากตัวเครื่องอัดและมอเตอร์อาจเสียบหรือเกิดไฟฟ้าลัดวงจรถ้าฝนตก

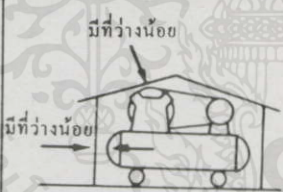

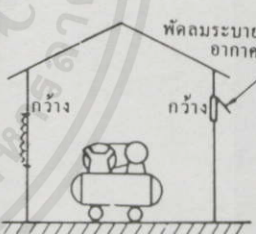
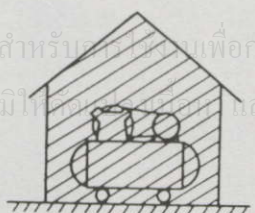
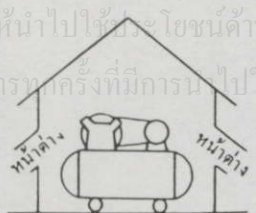
### 3.2.1.5 สภาพของการดูดอากาศ

1. อุณหภูมิของอากาศที่ดูดเข้าไปควรต่ำที่สุดที่จะเป็นไปได้และไม่เกิน  $40^{\circ}\text{C}$  ถ้าดูดเอาอากาศอุณหภูมิสูงเข้าไปอุณหภูมิอากาศออกและอุณหภูมิของชิ้นส่วนของเครื่องอัดจะสูงขึ้นทำให้เกิดอาการใช้งานสั้นลง สำหรับเครื่องอัดขนาดใหญ่ ควรเลี่ยงการดูดอากาศอุณหภูมิสูงขึ้นจากถึงอากาศหรือจากห้องและควรดูดอากาศจากภายนอกอาคารโดยผ่านการกรอง

2. ควรลดปริมาณฝุ่นให้เหลือน้อยที่สุดเท่าที่จะทำได้ ถึงแม้ว่าที่กรองทางเข้าเครื่องอัดอยู่แล้ว แต่ที่กรองก็อาจอุดตันถ้ามีฝุ่นเข้ามามากกับอากาศถ้าเป็นดังนี้ปริมาณอากาศที่ถูกเข้าเครื่องอัดจะลดลงทำให้สมรรถนะต่ำลง โดยเฉพาะอย่างยิ่งถ้ามีชิ้นละเอียดของวัสดุแข็งเช่น ผงเซรามิก หรือทรายเข้าไปในเครื่องอัด เสื้อสูบ ลูกสูบ ชุดวาล์ว และชุดรองลิ้นอาจเสียหายมาก ซึ่งอาจทำให้เกิดอุบัติเหตุร้ายแรงได้บางกรณี

3. อากาศควรแห้งที่สุดเท่าที่จะทำได้ ถ้าดูดอากาศชื้นเข้าไป ปริมาณน้ำที่ต้องออกไปจะมากซึ่งจะทำให้สนิม และในการเลือกตำแหน่งที่ตั้งของเครื่องอัดต้องคำนึงถึงอุณหภูมิอากาศชื้นมากด้วย

ตารางที่ 3.4 การเลือกตำแหน่งเพื่อการติดตั้งเครื่องอัดและข้อควรระวัง

หัวข้อที่	หัวข้อ	วิธีที่ผิด	ผลของการติดตั้งผิด	วิธีที่ถูกต้อง
(1)	○ จัดให้มีที่กว้างรอบๆ เครื่องอัดเพื่อความสะดวกในการตรวจ และการซ่อมบำรุงรักษา	○ เนื้อที่รอบเครื่องอัดน้อยเกินไป มีที่ว่างน้อย 	○ การตรวจประจำวันและการซ่อมบำรุงรักษาทำได้ยาก  ○ อุณหภูมิสูงในห้องเครื่องอัด ระดับน้ำมันเครื่องเพิ่มขึ้นกะทันหัน จารบี ในรองลิ้นละลายและไหลออก (สำหรับเครื่องอัดไม่ใช่ น้ำมันเครื่อง) สมรรถนะต่ำลงมอเตอร์ไหม้อายุการใช้งานสั้นลง	○ หักลมระบายอากาศ กว้าง กว้าง  ห้องมีการระบายอากาศเต็มที่
(2)	○ ติดตั้งในสถานที่ที่สว่าง	○ ติดตั้งในที่มืด 	○ การซ่อมบำรุงรักษาทำได้ยาก ○ การตรวจประจำวันทำได้ยาก ○ ไม่พบชิ้นส่วนที่ชำรุดได้ทันกาล	○ ติดตั้งในที่สว่าง 

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับครูในชมรมเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้เผยแพร่ข้อมูลนี้และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

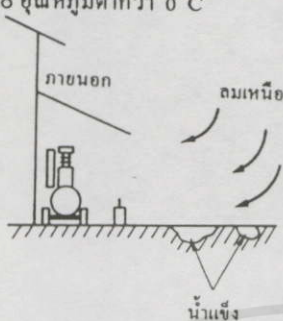
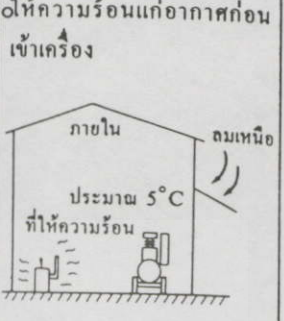


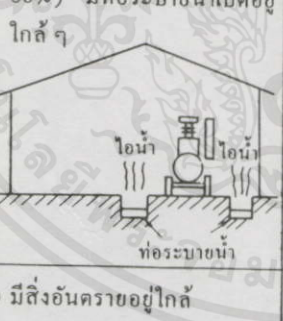
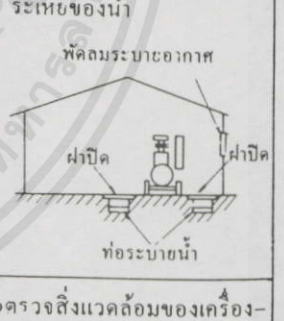

ตารางที่ 3.4 (ต่อ)

หัวข้อที่	หัวข้อ	วิธีที่ผิด	ผลของการติดตั้งผิด	วิธีที่ถูกต้อง
(3)	<ul style="list-style-type: none"> <li>อย่าติดตั้งในที่ที่มีฝุ่น (ต้องระวังเป็นพิเศษสำหรับเครื่องอัดที่ไม่ใช้น้ำมันเครื่อง)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>ไม่สามารถดูดอากาศสะอาดเข้า</li> </ul> <ul style="list-style-type: none"> <li>มีฝุ่นของดิน ซีเมนต์ เหล็ก ฯลฯ โคจรอบ</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>ที่กรองตันเร็วเกินไป (ทำให้สมรรถนะตก)</li> <li>เสียงสูบลึกเร็วกว่าปกติ</li> <li>วาล์วชำรุด</li> <li>ร่องลื่นชำรุด</li> <li>สิ่งแปลกปลอมปนเข้าไปในอากาศอัด</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>จัดให้มีที่ดูดลมเพื่อดูดลมสะอาดจากภายนอก</li> <li>อย่าให้ฝุ่นถูกดูดเข้าเครื่อง</li> </ul>
(4)	<ul style="list-style-type: none"> <li>อย่าติดตั้งในบริเวณที่อุณหภูมิห้องสูงและการระบายอากาศไม่ดี</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>อุณหภูมิห้องสูงกว่า 40°C</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>ระดับน้ำมันเครื่องเพิ่มกะทันหัน</li> <li>จารบีในร่องลื่นละลายและไหลออก (สำหรับเครื่องอัดที่ไม่ใช้น้ำมันเครื่อง)</li> <li>สมรรถนะตก</li> <li>มอเตอร์ไหม้</li> <li>อายุการใช้งานสั้นลง</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>อย่าติดตั้งในที่ที่อุณหภูมิสูง</li> <li>ระบายอากาศอย่างเต็มที่</li> </ul>
		<ul style="list-style-type: none"> <li>เครื่องอัดอยู่ใกล้ฝาเกินไป</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>ปริมาณอากาศหล่อเย็นลดลง ผลของการหล่อเย็นลดลงและอุณหภูมิต่างๆ สูงขึ้น</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>ตั้งเครื่องห่างจากฝามากกว่า 30 ซม.</li> </ul>
		<ul style="list-style-type: none"> <li>ได้รับแสงอาทิตย์โดยตรง</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>อาจเกิดอุบัติเหตุจากการร้อนเกินไป</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>ควรมีหลังคา</li> </ul>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้เพื่อการศึกษเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.4 (ต่อ)

หัวข้อที่	หัวข้อ	วิธีที่ผิด	ผลของการติดตั้งผิด	วิธีที่ถูกต้อง
(5)	○อย่าติดตั้งในที่ที่อุณหภูมิต่ำ	○ อุณหภูมิต่ำกว่า 0°C 	○ สตาร์ทเครื่องอัดไม่ได้ ○ การหล่อลื่นด้วยจารบีใช้การไม่ได้ ○ วาล์วควบคุมความดัน วาล์วรักษาความปลอดภัย วาล์วปิดเปิด วาล์วระบายน้ำทิ้ง ฯลฯ ทำงานไม่ปกติเนื่องจากน้ำในอากาศอืดที่แข็งตัว ○ ถังอาจแตกเนื่องจากน้ำที่แข็งตัวในถังรับอากาศอืด	○ ให้ความร้อนแก่อากาศก่อนเข้าเครื่อง 
(6)	○อย่าติดตั้งในที่ชื้นหรือที่ที่ไม่มีหลังคา	○ เครื่องอัดตากฝน 	○ การทำงานผิดปกติหรือเกิดอุบัติเหตุเนื่องจากไฟฟ้า	○ ติดตั้งในร่ม ถ้าจำเป็นต้องติดตั้งกลางแจ้งจัดให้มีหลังคาคลุมเครื่องอัดเพื่อกันฝน 
		○ ความชื้นสัมพัทธ์สูง (สูงกว่า 80%) มีท่อระบายน้ำเปิดอยู่ใกล้ๆ 	○ น้ำที่กลั่นตัวจากไอน้ำมีมากขึ้น และชั้นส่วนจะขึ้นสนิมเร็วขึ้น แหวนลูกสูบอาจสึกหรือเร็วผิดปกติ	○ ปิดท่อระบายน้ำเพื่อกันการระเหยของน้ำ พัดลมระบายอากาศ 
(7)	○อย่าติดตั้งในบริเวณที่มีก๊าซที่ติดไฟง่าย (เช่น อาเซทีลีน โพรแพน ฯลฯ) หรือก๊าซที่กัดกร่อน? (เช่น คลอรีน ซัลเฟอร์รัส แอนไฮไดรด์ ฯลฯ หรือในบริเวณที่ใกล้กับสิ่งที่ทำให้เกิดอันตราย	○ มีสิ่งอันตรายอยู่ใกล้ 	○ จะระเบิดถ้าอุณหภูมิห้องสูงพอ ○ ก๊าซติดไฟง่ายอาจติดไฟจาก spark ที่เกิดจากไฟฟ้า ○ สิ่งอันตรายอาจรั่วออกมาเนื่องจากการสั่น ○ มีการสึกหรือเร็วผิดปกติของเครื่องอัด ○ มีการกัดกร่อนที่ถังเก็บอากาศอัดและท่อ ○ น้ำมันหล่อลื่นเสื่อมสภาพ	○ ตรวจสอบสิ่งแวดล้อมของเครื่อง- ○ อัดแล้วติดตั้งในที่ปลอดภัย ○ ระบายอากาศเต็มที่ ○ มีมาตรการป้องกันการระเบิดถ้าถึงติดตั้งในบรรยากาศที่ระเบิดได้ง่าย (มอเตอร์ สวิตช์แม่เหล็ก สวิตช์ความดัน และสายไฟฟ้าต้องเป็นชนิดปลอดภัยจากการระเบิด หรือชนิดทนความดันและปลอดภัยจากการระเบิด)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับบุคลากรในโรงงานเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่ ใช้ประโยชน์ การค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

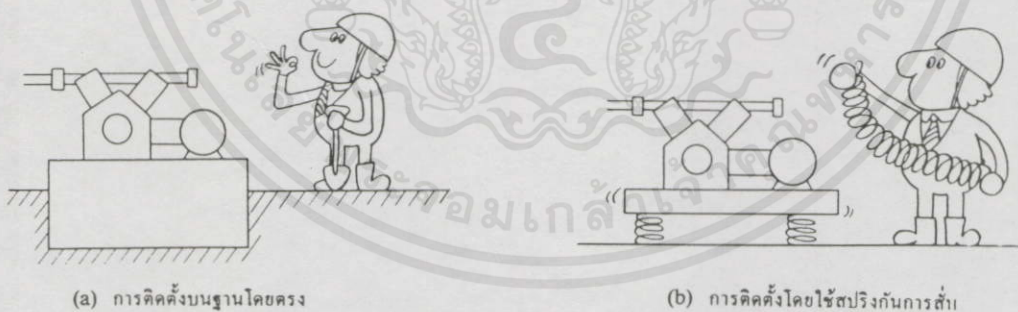
### 3.2.1.6 ฐาน

เพื่อให้เครื่องอัดทำงานได้ยาวนานในสภาพดี ฐานจะต้องแข็งแรงและเสถียร (Stable) ในขั้นต้นต้องตรวจสอบสภาพพื้นดิน คุณสมบัติของดิน ตลอดจนความสามารถในการรับน้ำหนักของดิน และถ้าจำเป็นก็ต้องตอกเข็ม นอกจากนี้ควรสร้างฐานเครื่องอัดลมแยกออกจากฐานของอาคารเพื่อป้องกันไม่ให้เกิดการสั่นสะเทือนของเครื่องอัดส่งไปถึงอาคารและอุปกรณ์อื่น นอกจากนี้ต้องกำหนดความสูงของฐานจากพื้นโดยการคำนึงถึงการระบายน้ำ การกำจัดน้ำมันเครื่องรั่วออกมาจากเครื่องอัดและการบำรุงรักษา

ฐานมีหน้าที่รับเครื่องอัด ดังนั้นต้องสามารถป้องกันไม่ให้เครื่องอัดเคลื่อนที่หรือจมลง

ปัญหาร้ายแรงที่อาจเกิดจากเครื่องอัดเกี่ยวกับฐานคือการส่งทอนความสั่นสะเทือนไปสู่โครงการอื่น การเสียหายที่เกิดจากความล้าของท่อสลิปเนื่องมาจากการสั่นสะเทือนของเครื่องอัด เมื่อจะสร้างฐานมีวิธีอยู่สองวิธี วิธีที่หนึ่งคือสร้างฐานขึ้นมาจากพื้นดิน ให้นั่นคงและฐานยึดติดกับพื้นดินให้แน่นเพื่อลดการสั่นสะเทือนของเครื่องอัดวิธีที่สองนั้นเครื่องอัดจะยึดกับฐาน โดยผ่านสิ่งยึดหยุ่นได้เช่นสปริง เพื่อให้ตัวเครื่องอัดสั่นได้ แต่ไม่ได้การสั่นถูกส่งทอดไปถึงพื้น

วิธีแรกเรียกว่าวิธีติดตั้งโดยตรง และใช้สำหรับโรงงานวิศวกรรมโยธาซึ่งการถ่ายทอดของการสั่นไม่ทำให้เกิดปัญหา วิธีหลังเรียกว่า การแยกการสั่นใช้ในกรณีที่ดินสภาพไม่ดี หรือเมื่อเครื่องอัดอยู่บนชั้นสอง หรืออยู่บนอาคารและไม่ต้องการให้ถูกส่งทอดไปยังส่วนอื่นๆ ของอาคาร



รูปที่ 3.28 ฐานของเครื่องอัดอากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

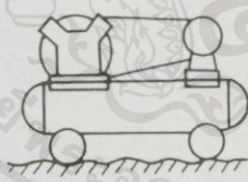
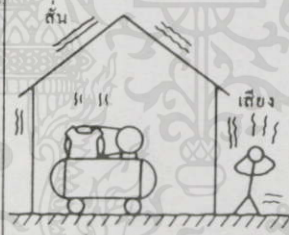
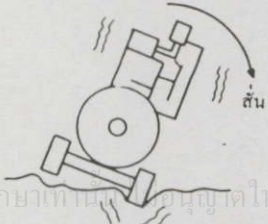
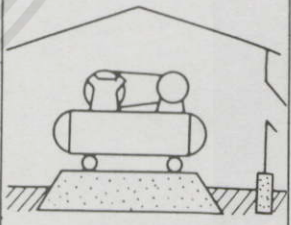
3.2.1.7 การติดตั้ง

ตรวจให้แน่ใจว่าฐานคอนกรีตแข็งแรงเต็มที่แล้ว และตรวจว่าตำแหน่งของการสลักเกลียวถูกต้องตามแบบของฐานหรือไม่

สลักเกลียวยึดฐานนั้น ถ้ากำหนดตำแหน่งฐานขณะที่ติดตั้งเครื่องอัดตำแหน่งนั้นก็ถูกต้อง ฟังสลักเกลียวไว้ล่วงหน้า ตำแหน่งของสลักเกลียวต้องเป็นไปตามแบบของฐานและถ้าจำเป็นก็ต้องใช้แผ่นกำหนดตำแหน่งวางทาบไปบนฐาน สลักเกลียวแต่ละตัวต้องมีความยาวส่วนหนึ่งยื่นขึ้นมาจากฐาน หนึ่งส่วนสามของสลักเกลียวต้องยื่นขึ้นมาจากคอนกรีต เพื่อประโยชน์ในการปรับในระหว่างการติดตั้งเครื่องอัด

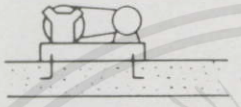
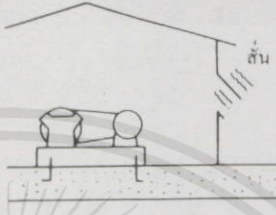
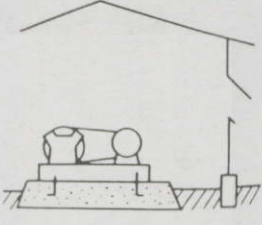

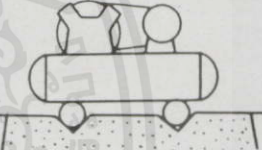
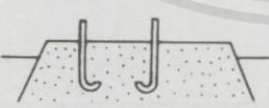
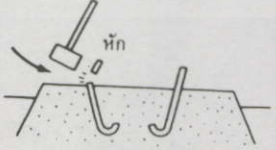
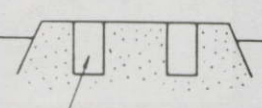

เครื่องอัดและมอเตอร์ต้องได้รับการปรับระดับความตึงของสายพาน V และเครื่องอัดที่ต่อตรงกับมอเตอร์โดยผ่านประกับต่อเฟลา (Coupling) ต้องมีการตั้งศูนย์ ในการติดตั้งต้องปฏิบัติตามแบบการติดตั้งและข้อแนะนำที่มากับเครื่อง ตารางที่ 3.5

ตารางที่ 3.5 ข้อควรระวังในเรื่องฐานและการติดตั้ง

หัวข้อที่	หัวข้อ	วิธีที่ผิด	ผลของการติดตั้งผิด	วิธีที่ถูกต้อง
(1)	อย่าติดตั้งบนพื้นที่สภาพของดินไม่ดี	ติดตั้งเครื่องอัดบนพื้นที่สภาพของดินไม่ดีโดยไม่ได้ตรวจสอบสภาพของดิน  พื้นที่สภาพของดินไม่ดี	 ปัญหาเสียงดัง การร้องเรียนของผู้ที่อาศัยอยู่ในอาคาร ประสิทธิภาพการทำงานต่ำ ทำให้อาคารและโครงสร้างใกล้ ๆ  พื้นที่สภาพของดินไม่ดี	ระบายน้ำออกจากที่ที่จะติดตั้ง จัดให้มีฐานที่แข็งแรง ฐานต้องได้ระดับอยู่ในแนวราบ 

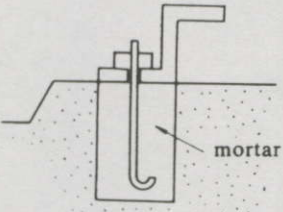
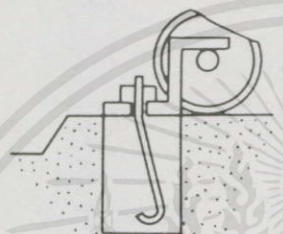
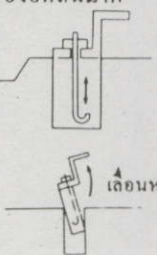
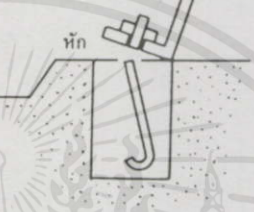
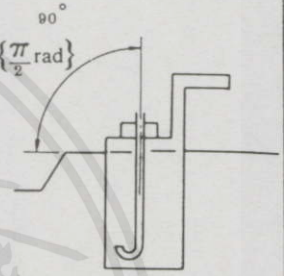
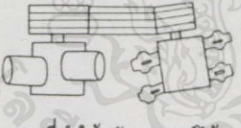
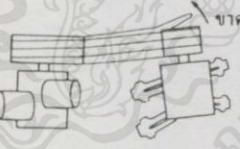
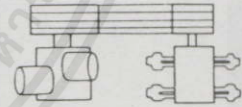
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น กรุณาอย่าเผยแพร่ให้มาไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.5 (ต่อ)

หัวข้อ ที่	หัวข้อ	วิธีที่ผิด	ผลของการติดตั้งผิด	วิธีที่ถูกต้อง
		<p>○ ใช้พื้นคอนกรีตเป็นฐาน</p>  <p>พื้นคอนกรีตอยู่บนพื้น</p>	<p>○ การสั่นถูกส่งต่อไปที่หน้าต่างของอาคาร</p> 	<p>○ แยกฐานเครื่องอัดออกจากพื้น</p> 
(2)	<p>○ ติดตั้งให้ไต่ระดับ (อยู่ในแนวราบ)</p>	<p>○ ติดตั้งเครื่องอัดบนพื้นเอียง</p>  <p>เอียง</p> <p>อย่างน้อย 5° (0.09 ราเดียน)</p>	<p>○ เครื่องอัดเคลื่อนที่ในระหว่างการใช้งาน</p> <p>○ ระดับน้ำมันเครื่องในฐานเครื่องต่างกันจึงอาจทำให้บางส่วนไม่ได้รับการหล่อลื่นและเสียหายได้</p>	<p>○ จัดให้มีร่องหรือรอยบุบบนฐานและติดตั้งบนฐานและติดตั้งเครื่องอัดให้ไต่ระดับ</p> 
(3)	<p>○ เมื่อใช้สลักเกลียวยึด</p> <p>① จัดให้ระยะระหว่างสลักเกลียวตรงกับระยะระหว่างรูของเครื่องอัด</p>	<p>○ ผึงสลักเกลียวยึดก่อนการติดตั้ง</p> 	<p>○ สลักเกลียวไม่ตรงกับรูของเครื่องอัด</p> <p>○ การตอกให้สลักเกลียวตรงรูอาจทำให้สลักเกลียวหัก</p> 	<p>1) ผึงสลักเกลียวพร้อมกับการติดตั้ง</p>  <p>เติม mortar หลังจากติดตั้งแล้ว</p> <p>2) ผึงสลักเกลียวให้ตรงกับรูของเครื่องอัด</p> <p>แผ่นแบบ (template)</p>  <p>ผึงเพียง 2/3 ของส่วนล่างของสลักเกลียว ปล่อยให้ส่วนบนไม่ถูกยึด</p>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่หรือใช้เพื่อการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ตารางที่ 3.5 (ต่อ)

หัวข้อที่	หัวข้อ	วิธีที่ผิด	ผลของการติดตั้งผิด	วิธีที่ถูกต้อง
	<p>② mortar ต้องยึดติดกับคอนกรีตอย่างเต็มที่</p> <p>③ สลักเกลียวต้องตั้งฉากกับผิวของฐาน</p>	<p>○ สลักเกลียวยึดไม่แน่น</p>  <p>คอนกรีตสลักเกลียวไม่แน่น</p> <p>○ สลักเกลียวยึดไม่ตั้งฉากกับผิวของฐาน</p> 	<p>○ ชั้นสลักเกลียวให้แน่นไม่ได้</p> <p>○ เครื่องอัดสั้นมาก</p>  <p>○ สลักเกลียวอาจหักระหว่างการใช้งาน</p> 	<p>○ เดินเครื่องอัดหลังจาก mortar แข็งเต็มที่แล้ว</p> <p>○ สลักเกลียวต้องตั้งฉากกับหน้าราบของฐาน</p> 
(4)	<p>○ งานสายพานของเครื่องอัดต้องขนานกับงานสายพานของมอเตอร์</p> <p>○ แท่นรับที่ทำให้ขั้วมอเตอร์ได้ต้องขนานกับสายพาน - V</p>	<p>○ งานสายพานของเครื่องอัดไม่ขนานกับงานสายพานของมอเตอร์</p> <p>○ แท่นรับที่ทำให้มอเตอร์ขั้วได้ไม่ขนานกับสายพาน - V</p> 	<p>○ เกิดเสียงผิดปกติ</p> <p>○ สายพานขาด</p> <p>○ แนวของสายพานจะเฉียงไปถ้าขั้วมอเตอร์เพื่อให้สายพานตึง</p> 	<p>○ ติดตั้งให้งานสายพานของเครื่องอัดขนานกับงานสายพานของมอเตอร์</p> <p>○ ติดตั้งให้แท่นรับมอเตอร์ขนานกับสายพาน - V</p> 

## 3.2.1.8 ระบบท่อ

เครื่องอัดเคลื่อนที่ได้ขนาดเล็กและขนาดกลาง และเครื่องอัดที่มาจากโรงงานเป็นชุด (Package) ในระยะหลังจะมีระบบท่อภายในอยู่เรียบร้อยแล้ว การต่อท่อจึงง่าย สำหรับเครื่องอัดขนาดใหญ่ ต้องใช้ความระมัดระวังมากในการต่อระบบท่อที่ซับซ้อนเพราะถ้าต่อท่อไม่ดี อาจเกิดปัญหาท่อแตก ประเภทของท่อที่ต้องใช้มีท่อจ่ายลม ท่อลดอัตราการอัด และท่อหล่อเย็น

## 3.2.1.9 ท่อจ่ายลม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ข้อควรระวังในการออกแบบและการต่อท่อมืดดังต่อไปนี้

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกรุ่นห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. ท่อที่เปื้อนเพราะมีน้ำมันติดอยู่หรือเป็นสนิม หรือมียาง (Tar) ถ่ายหินหรือสีติดอยู่นั้น

ห้ามใช้

2. ควรใช้วิธีการต่อท่อโดยข้อต่อหน้าแปลน (Welded Flange) ในการต่อท่อจ่ายลม

3. ในกรณีที่ท่อจ่ายลม (ท่อจากทางออกของเครื่องอัดไปถึงทางเข้าของถังลม หรือที่หล่อเย็นหลังการอัด) สั่นเข้าจังหวะกับการเปลี่ยนในความดันของอากาศขาออก อาจเกิดปัญหาเช่นอายุการใช้งานของเครื่องอัดลมลดลง สมรรถนะและประสิทธิภาพลดลง และมีการสั่นของท่อและอาจเกิดเสียงผิดปกติได้ความถี่ธรรมชาติของอากาศในท่อลมขาออกคำนวณได้จากสูตรข้างล่าง ความถี่ธรรมชาติของอากาศในท่อลมขาออกคำนวณได้จากสูตรข้างล่าง ความถี่ธรรมชาตินี้ต้องไม่เท่ากับความถี่ของการจ่ายลมของเครื่องอัด มิฉะนั้นจะเกิดการสั่นเข้าจังหวะ(Resonance)

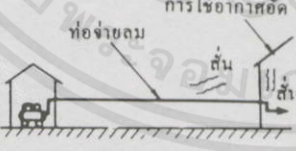
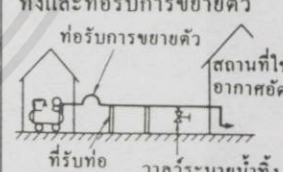
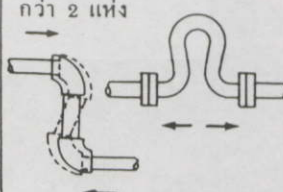
4. อุณหภูมิของอากาศขาออกจะสูงถึง  $140-180^{\circ}\text{C}$  ดังนั้นท่อจ่ายลมต้องสามารถรับการขยายตัวที่เกิดจากความร้อนถ้าท่อยาวมาก ควรใช้มากกว่าสองชุดของท่อต่อรูปตัว U เพื่อรับการขยายตัวหรือใช้ข้อต่อยืดหยุ่นได้

5. ควรติดตั้งที่หล่อเย็นหลังจากการอัดติดๆกับเครื่องเพื่อลดการขยายตัวเนื่องจากความร้อนและเพื่อแยกน้ำออกเสียก่อน

6. ต้องมีที่รับท่อที่เหมาะสมเพื่อลดการสั่น

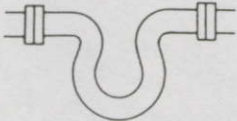
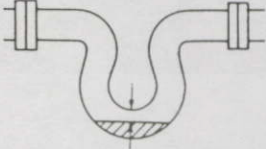
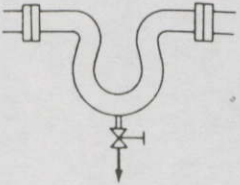
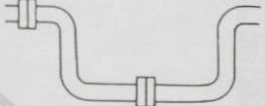


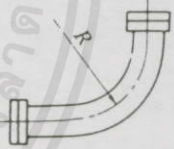
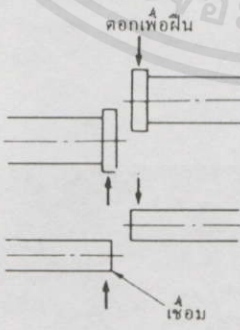
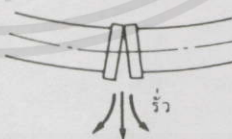
7. ต้องไม่มีวาล์วปิดในท่อจ่ายลม ถ้าจำเป็นต้องมีก็ติดตั้งวาล์วรักษาความปลอดภัยซึ่งมีขนาดใหญ่พออยู่ระหว่างเครื่องอัดและวาล์วปิดนั้น

### ตารางที่ 3.6 ข้อควรระวังในการติดตั้งท่อจ่ายลม

หัวข้อที่	หัวข้อ	วิธีที่ผิด	ผลของการติดตั้งผิด	วิธีที่ถูกต้อง
(1)	<p>ควรติดตั้งเครื่องอัดให้ไกลบริเวณที่ต้องการใช้อากาศอัดให้มากที่สุดเท่าที่จะทำได้และท่อจ่ายลมต้องสั้น ถ้าจำเป็นต้องใช้ท่อยาวต้องมีที่รับท่อที่เหมาะสมเพื่อการสั่นและให้การขยายตัว เพราะความร้อนของท่อได้</p>	<p>สถานที่ที่ต้องการใช้อากาศอัดอยู่ไกลเกินไปจากเครื่องอัด</p> <p>สถานที่ที่ต้องการใช้อากาศอัด</p> 	<p>ท่อสั้นมาก อาคารสั่นด้วย เกิดเสียงรบกวน</p> <p>ความต้านทานในท่อจ่ายลมเพิ่มและความดันตก</p> <p>มีน้ำที่กลั่นตัวอยู่ในท่อจ่ายลม</p>	<p>ติดตั้งที่รับท่อวาล์วระบายน้ำทิ้งและท่อรับการขยายตัว</p>  <p>ที่รับท่อ วาล์วระบายน้ำทิ้ง</p> <p>ติดตั้งท่อรับการขยายตัวมากกว่า 2 แห่ง</p> 

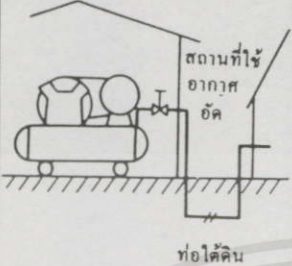
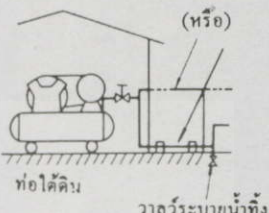
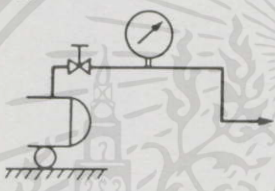
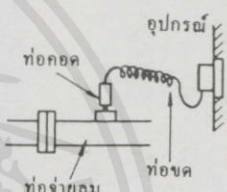
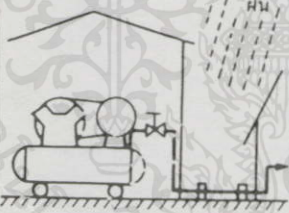
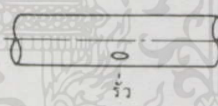
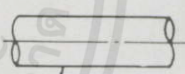
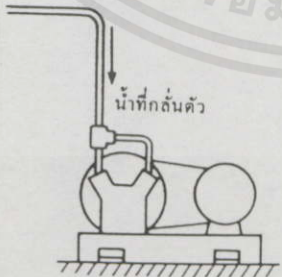
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งยังเป็นไฟล์ต้นฉบับที่อาจมีข้อผิดพลาดและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.6 (ต่อ)

หัวข้อที่	หัวข้อ	วิธีที่ผิด	ผลของการติดตั้งผิด	วิธีที่ถูกต้อง
(2)	<p>○ น้ำที่กลั่นตัวจะอยู่ในท่อ B จัดให้มีวาล์วระบายน้ำทิ้งหรือติดตั้งท่อ B โดยให้ส่วน B อยู่ด้านบน</p>	<p>○ ใช้ท่อ B โดยส่วนที่เป็น U อยู่ด้านล่าง</p> 	<p>○ น้ำที่กลั่นตัวอยู่ในท่อ B</p> <p>○ ท่อจ่ายลมขึ้นสนิม</p> <p>○ น้ำขวางทางลมทำให้ความดันทานสูงและความดันตก</p> 	<p>○ จัดให้มีวาล์วระบายน้ำทิ้ง</p>  <p>○ ทำให้ท่อ B อยู่ในรูปแบบที่ถอดทำความสะอาดได้สะดวก</p>  <p>○ ให้ส่วนที่เป็น U อยู่ด้านบน</p> 
(3)	<p>○ ในการคัดท่อจ่ายลมรัศมีความโค้งต้องสูงกว่า 3 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางท่อเพื่อไม่ให้มีความเค้นสูงเกินไป</p>	<p>○ ท่อที่ถูกบังคับให้มีรัศมีความโค้งต่ำ</p> 	<p>○ แดก</p>	<p>○ ต้องสูงกว่า 3 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อ</p> 
(4)	<p>○ อย่าใช้แรงฝืนท่อนในการต่อท่อ</p>	<p>○ ฝืนท่อเพื่อให้อัดได้</p> <p>ดอกเพื่อฝืน</p>  <p>เชื่อม</p>	<p>○ อากาศรั่ว</p>  <p>รั่ว</p> <p>○ เกิดการสั่นได้ง่าย</p> <p>○ ท่อแตกตรงจุดที่ได้รับความดันสูง</p>	<p>○ เชื่อมท่อที่สถานที่ใช้งานโดยไม่ใช้แรงฝืน</p>

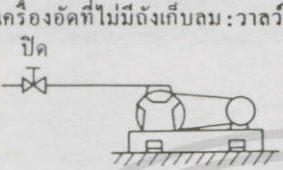
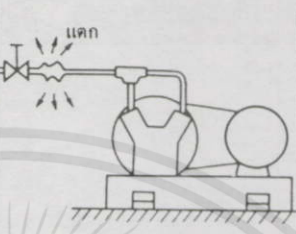
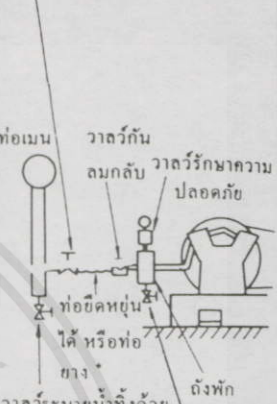
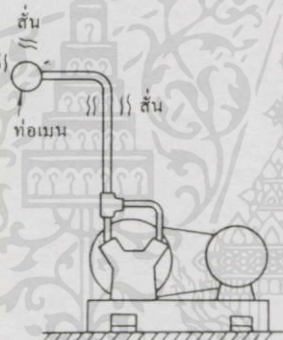
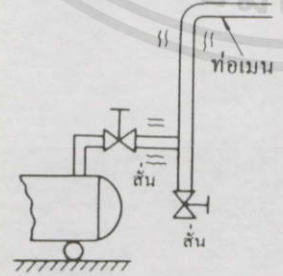
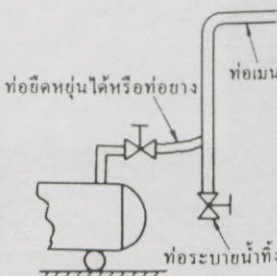
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ในการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.6 (ต่อ)

หัวข้อที่	หัวข้อ	วิธีที่ผิด	ผลของการติดตั้งผิด	วิธีที่ถูกต้อง
(5)	○อย่าเดินท่อใต้ดิน	○ ทำความสะอาดท่อจ่ายลมไม่ได้ 	○ น้ำที่กลั่นตัวค้างอยู่ในท่อใต้ดิน ○ ท่อเป็นสนิมเร็ว	○ อย่าฝังท่อไว้ใต้ดิน 
(6)	○อย่าติดตั้งอุปกรณ์วัดติดกับท่อโดยตรง	○ อุปกรณ์วัดโดยตรงกับท่อจ่ายลม 	○ อุปกรณ์วัดอ่านคลาดเคลื่อน เพราะการสั่นและการแปรเปลี่ยนของการไหลของลมและความดัน ○ คลาดเคลื่อนเพราะอุณหภูมิสูง	○ ใช้ท่อคอคอด (choke tube) หรือท่อขด 
(7)	○ในสภาพที่ชื้นสนิมง่าย ใช้ท่อ white gas หรือสีกันสนิมทา	○ ท่อกลางแจ้ง 	○ อากาศรั่ว 	 ท่อ white gas หรือใช้สีกันสนิมทา
(8)	○อย่าติดตั้งท่อตรงขึ้นไปจากเครื่องอัดเพราะน้ำที่กลั่นตัวอาจไหลสวนทางลมเข้าเครื่อง ถ้าเสี่ยงไม่ได้ต้องมีวาล์วระบายน้ำทิ้งและที่รับน้ำทิ้ง ในการต่อท่อตรงขึ้นไปดังกล่าวนี้ น้ำที่กลั่นตัวอาจเข้าไปโดยตรงสู่ฝาเสื้อสูบ	○ ท่อต่อตรงขึ้นไปจากเครื่องอัด 	○ น้ำไหลสวนทางลมเข้าเครื่องวาล์วขึ้นสนิมแหวนลูกสูบสึกเร็วผิดปกติ	○ จัดให้มีข้อต่อเช่น ข้องอ ข้อต่อ 3 ทาง ก่อนที่ท่อจะถึงทางเข้าฝาเสื้อสูบ ติดตั้งถังพักไว้เพื่อลดการแปรเปลี่ยนในความดันและเพื่อดักน้ำที่กลั่นตัวออกเสีย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.6 (ต่อ)

หัวข้อที่	หัวข้อ	วิธีที่ผิด	ผลของการติดตั้งผิด	วิธีที่ถูกต้อง
(9)	<p>○ ถ้ามีวาล์วปิด (stop valve) ต้องมีวาล์วรักษาความปลอดภัยที่มีขนาดใหญ่พอระหว่างวาล์วปิดและเครื่องอัด (ถังเก็บลมของโมเดลมาตรฐานมีวาล์วรักษาความปลอดภัยติดอยู่กับถัง)</p>	<p>○ ไม่มีวาล์วรักษาความปลอดภัย (safety valve) โดยมีวาล์วปิดอยู่กับท่อจ่ายลม</p> <p>เครื่องอัดที่ไม่มีถังเก็บลม : วาล์วปิด</p> 	<p>○ มอเตอร์รับภาระเกินกำลัง ถ้าปิดวาล์วในขณะที่เดินเครื่อง</p> <p>○ ท่อแตก</p> 	<p>วาล์วปิด (ในตำแหน่งปกติวาล์วนี้ควรเปิด และต้องไม่มีมือหมุนติดอยู่ หรือใช้วาล์วที่แสดงภาพว่าเปิดหรือปิดอยู่)</p> 
(10)	<p>○ คอท่อขีดหยุดน้ำได้หรือท่อตาย เพื่อป้องกันการส่งทอดของการสั่นจากเครื่องอัดสู่อุโมงค์</p>	<p>○ คอท่อโดยไม่มีท่อขีดหยุดน้ำได้</p> 	<p>○ เสี่ยงผิดปกติ</p> <p>○ ท่อแตก</p>	<p>วาล์วระบายน้ำทิ้งด้วยมือหรืออัตโนมัติ (เปิดน้ำทิ้งวันละ 1 ครั้ง)</p> <p>วาล์วระบายน้ำทิ้ง (เปิดวาล์ว 1 ครั้งเมื่อหยุดเครื่อง)</p> <p>* ท่อตาย : ท่อวางที่ทนความดันและความร้อน</p>
		<p>○ ท่อคอโดยไม่มีท่อขีดหยุดน้ำได้</p> 	<p>○ เสี่ยงผิดปกติ</p> <p>○ ท่อแตก</p>	<p>○ คอท่อโดยมีท่อขีดหยุดน้ำได้หรือท่อตาย</p> 

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

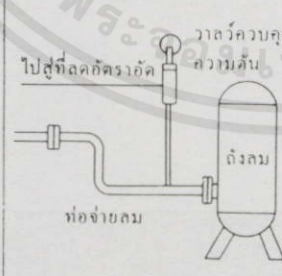
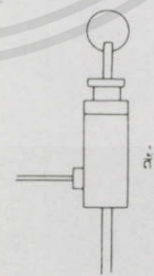
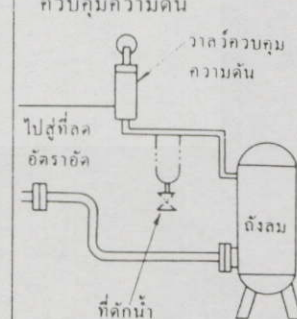
### 3.2.1.10 ท่อลดอัตราการอัด (Unloading Pipe)

ข้อควรระวังในการออกแบบ และต่อท่อลดอัตราการอัดมีดังต่อไปนี้

1. ต้องมีท่อลดอัตราการอัดต่อระหว่างวาล์วควบคุมความดันและถังเก็บลม ถ้าต่อตรงกับท่อจ่ายลมโดยไม่ผ่านถังลม วาล์วควบคุมความดันอาจทำงานไม่ปกติ เนื่องมาจากการแปรเปลี่ยนความดันในท่อจ่ายลมนอกจากนี้ยังมีน้ำติดเข้าไปในท่อจ่ายลม ซึ่งเป็นอุปสรรคต่อการทำงานและทำให้ชีวิตใช้งานของวาล์วสั้นลง ถ้าจำเป็นก็ควรมีถังแยกน้ำทิ้งไปเพื่อป้องกันไม่ให้น้ำเข้าไปทำอันตรายแก่วาล์วควบคุมความดัน
2. ภายในของท่อลดอัตราการอัดต้องสะอาดจริงๆ ห้ามใช้ท่อที่ผิวภายในเคลือบด้วยยางจากถ่านหิน หรือด้วยวัสดุอื่น
3. ก่อนการติดตั้งวาล์วควบคุมความดัน ควรเป่าลมทิ้งหลายชั่วโมงเพื่อป้องกันมิให้เศษเหล็ก หรือสนิมจากถังลมและท่อจ่ายลมเข้าไปในวาล์วควบคุมความดัน
4. ควรใช้ท่อลดอัตราการอัด ในขนาดที่กำหนด ถ้าความยาวของท่อเกิน 10 m หรือถ้าสงสัยว่าท่ออาจเล็กเกินไป ควรใช้ท่อใหญ่ขึ้นหนึ่งขนาดเพื่อให้วาล์วควบคุมความดันทำงานได้ดี
5. ต้องไม่มีวาล์ว (Stop Valve) ในระบบท่อลดอัตราการอัด ถ้าจำเป็นต้องมีวาล์วนี้ต้องเปิดในระหว่างการใช้งาน

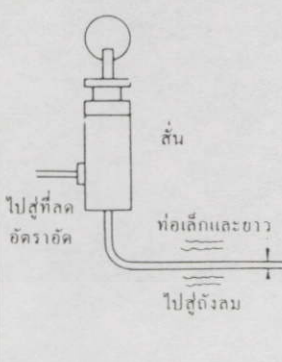
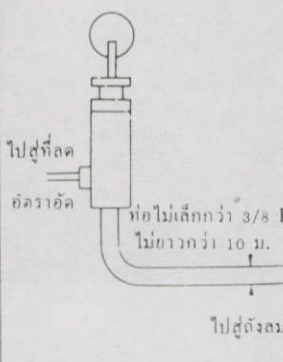

ข้อควรระวังสำหรับระบบท่อที่มีในตาราง 3.7

### ตารางที่ 3.7 ข้อควรระวังในการติดตั้งระบบท่อลดการอัด

หัวข้อที่	หัวข้อ	วิธีที่ผิด	ผลของการติดตั้งผิด	วิธีที่ถูกต้อง
(1)	<ul style="list-style-type: none"> <li>ต่อระบบท่อลดอัตราการอัดกับส่วนบนของถังเพื่อมิให้น้ำที่กลั่นตัวเข้าสู่วาล์วควบคุมความดัน</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>ต่อระบบท่อลดอัตราการอัดจากท่อจ่ายลม</li> </ul> 	<ul style="list-style-type: none"> <li>วาล์วควบคุมความดันทำงานไม่ได้ดี เนื่องจากกรแปรเปลี่ยนของความดัน</li> </ul> 	<ul style="list-style-type: none"> <li>ต่อระบบท่อเข้ากับส่วนบนของถังลม</li> <li>อย่าให้น้ำที่กลั่นตัวเข้าสู่วาล์วควบคุมความดัน</li> </ul> 

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

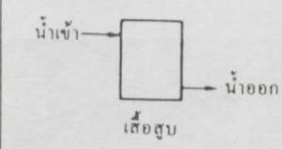
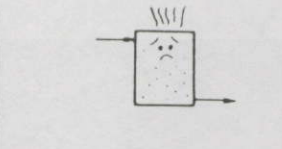
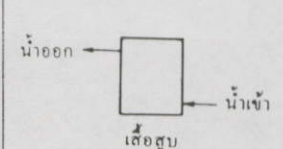
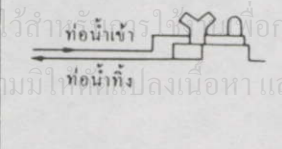
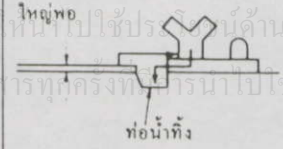
ตารางที่ 3.7 (ต่อ)

<p>(2) ○ เส้นผ่านศูนย์กลางและความยาวของท่อต้องเหมาะสมที่จะทำให้วาล์วควบคุมความดันไม่สั่น</p>	<p>○ ท่อเล็กและยาวเกินไป</p> 	<p>○ วาล์วควบคุมความดันทำงานไม่ปกติ</p>	
<p>(3) ○ อย่าติดตั้งวาล์วปิดเข้ากันที่ท่อลดอัตราอัด ถ้ามีต้องเปิดอยู่ระหว่างการใช้งาน (มีการแสดงสภาพเปิดปิด)</p>	<p>○ มีวาล์วปิดที่ท่อลดอัตราอัด</p> 	<p>○ อาจล้มเปิดวาล์วในระหว่างการทำงานของเครื่องอัด</p>	

3.2.1.11 ระบบท่อหล่อเย็นและระบบท่ออื่น

ข้อควรระวังสำหรับการออกแบบและต่อท่อน้ำเย็นและระบบท่ออื่น มีในตารางที่ 3.8

ตารางที่ 3.8 ข้อควรระวังสำหรับการออกแบบและต่อท่อน้ำเย็นและเรื่องอื่น

หัวข้อที่	หัวข้อ	วิธีที่ผิด	ผลของการติดตั้งผิด	วิธีที่ถูกต้อง
(1)	น้ำหล่อเย็นต้องเข้าทางที่ด้านล่างและออกทางที่ด้านบน	<p>น้ำหล่อเย็นเข้าทางที่ด้านบนและออกทางที่ด้านล่าง</p> 	<p>○ ส่วนขดไม่ได้รับการหล่อเย็นอย่างเต็มที่</p> 	<p>○ น้ำหล่อเย็นต้องเข้าทางที่ด้านล่างและออกทางที่ด้านบน</p> 
(2)	ใช้ท่อที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและความยาวที่เหมาะสม	<p>ท่อเล็กและยาวเกินไป</p> 	<p>○ ความต้านทานในท่อมักทำให้ความดันตก ○ น้ำระบายออกไม่หมด</p>	<p>ท่อน้ำเข้าขนาดใหญ่พอ</p> 

### ตารางที่ 3.8 (ต่อ)

(3)	ความดันของน้ำควรสูงกว่า 1.5 กก./ชม. <sup>2</sup>	ความดันของน้ำต่ำหรือสูงเกินไป	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ ถ้าความดันต่ำน้ำไหลไม่เพียงพอ</li> <li>○ ถ้าความดันสูงเกินไปน้ำรั่วจากแผ่นกันรั่วที่ข้อต่อหรือ</li> </ul>	
(4)	ติดตั้งอุปกรณ์ที่เหมาะสมสำหรับระบบน้ำหล่อเย็น	ใช้รีเลย์ปิด - เปิดไม่ถูกต้อง	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ เกิดการทำงานไม่ถูกต้อง (เครื่องอัดไม่หยุดทำงานหลังจากน้ำหล่อเย็นขาด) ทำให้เสียสุขภาพ</li> </ul>	○ ใช้รีเลย์ปิด - เปิดตามที่กำหนด
		ขนาดของท่อฝั่งน้ำเล็กเกินไป	○ น้ำหล่อเย็นอุณหภูมิสูงเกินไป	○ ใช้ท่อฝั่งน้ำที่มีขนาดเหมาะสม
(5)	ที่รับและที่ยึดของระบบท่อต้องเหมาะสมในการป้องกันการสั่น	ตำแหน่งของที่ยึดไม่เหมาะสม	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ ท่อสั่น</li> </ul>	○ ติดตั้งที่ยึดใกล้ข้องอ

#### 3.2.1.12 ระบบสายไฟฟ้า

ในการเดินสายไฟฟ้าต้องใช้สายไฟฟ้าคุณภาพดีเป็นไปตามมาตรฐานทางเทคนิคสำหรับงานเช่นนี้และตามข้อบังคับที่กำหนดโดยการไฟฟ้าฯ มีข้อควรระวังดังต่อไปนี้สำหรับการเดินสายไฟฟ้า

1. ระวังเป็นพิเศษในเรื่องขนาดของสายไฟฟ้าขนาดของฟิวส์และขนาดของสวิตช์ ใช้วัสดุและอุปกรณ์ตามที่กำหนดในหนังสือคู่มือ

2. ถ้าสายไฟฟ้ายาวเกินไป หรือขนาดเล็กเกินไป แรงดัน ไฟฟ้าอาจจะตกมากจนเกิดปัญหาในการเริ่มเดินเครื่องอัด ค่าแรงดันไฟฟ้า ที่ขั้วของมอเตอร์ต้องไม่ต่ำกว่า 90% ของค่าแรงที่กำหนด

#### 3.2.1.13 การทดสอบในที่ใช้งาน

ต้องมีการทดสอบโดยละเอียดถี่ถ้วนในที่ใช้งานหลังจากติดตั้งเครื่องอัดเสร็จ ก่อนการทดสอบต้องให้แน่ใจว่าได้ปฏิบัติตามข้อควรระวังในการติดตั้งโดยสมบูรณ์แล้ว การตรวจก่อนการทดสอบในที่ใช้งาน ต้องตรวจก่อนการทดสอบในที่ใช้งาน

ต้องตรวจรายการต่อไปนี้ ก่อนการทดสอบในที่ใช้งาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

1. ตรวจสอบการติดตั้ง

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คิดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. ตรวจสอบของระบบท่อ

### 3. ตรวจสอบระบบสายไฟฟ้า

นอกจากนั้นต้องนำน้ำมันหล่อลื่นที่หมักกับเครื่องอัดเติมลงในเครื่องอัดก่อนการใช้งาน สำหรับเครื่องอัดขนาดเล็กมักจะถ่ายน้ำมันหล่อลื่นออกก่อนการขนส่งจากโรงงาน

ตารางที่ 3.9 การตรวจหาจุดที่เป็นปัญหาและวิธีการแก้ไขเครื่องอัดขนาดเล็ก

	อาการ	สาเหตุ	วิธีการแก้ไข
สตาร์ท เครื่องได้	ความดันไม่ขึ้นหรือ ขึ้นช้าเกินไป	วาล์วปล่อยน้ำทิ้งเปิดค้างหรือ รั่วจากที่รับหน้าวาล์ว	ขันให้แน่น เปลี่ยนถ้ายังคงรั่วหลังจากขันให้แน่นแล้ว
		รั่วผ่านแผ่นอัดกันรั่ว	ขันตะปูควงและสลักเกลียวให้แน่นเปลี่ยนแผ่นอัดกันรั่ว ถ้าเสื่อมสภาพ
		รั่วผ่านตะปูควง (screw)	ขันให้แน่น
		รั่วจากวาล์วรักษาความปลอดภัย	เปลี่ยนวาล์วรักษาความปลอดภัย
		วาล์วรักษาความปลอดภัยเสีย	ทำความสะอาดหรือเปลี่ยนชุดวาล์วของเครื่องอัด เปลี่ยน วาล์ว รักษาความปลอดภัยถ้ารั่วมากหรือชำรุด
		ที่วัดความดันแสดงความดัน ไม่ถูกต้อง	เปลี่ยนที่วัดความดัน
		ที่กรองด้านดูดอุดตัน	ทำความสะอาดด้วยแปรงหรือใช้สารเคมีที่ไม่เป็นกรด หรือด่าง เปลี่ยนถ้าที่กรองสกปรกเกินไป
	ท่ออุดตัน	ทำความสะอาดภายในท่อ	
	ความดันสูงเกิน ความดันสูงสุด	ที่วัดความดันแสดงความดัน ไม่ถูกต้อง	เปลี่ยนที่วัดความดัน
		สวิทช์ความดันเสีย	ปรับ
วาล์วควบคุมความดันเสียหรือ วาล์วรักษาความปลอดภัยเสีย		เปลี่ยนถ้าปรับไม่ได้	
มีเสียงผิดปกติ	ติดตั้งผิด	ติดตั้งให้อยู่ในแนวราบ (ใช้แผ่นโลหะบางหนูนถ้าจำเป็น)	
	ลูกสูบกระทบวาล์วเครื่องสูบ	เอาคาร์บอนออกจากส่วนบนของลูกสูบและเปลี่ยน แผ่นโลหะอัดกันรั่ว	
	มอเตอร์เสีย	ส่งซ่อมที่โรงงานที่ทำงานด้านมอเตอร์โดยเฉพาะ	
เปลี่ยนน้ำมันเครื่อง มากเกินไป	แหวนลูกสูบสึก มีรอยขีดขูด บนผิวเสื้อสูบ	เปลี่ยนแหวนลูกสูบ แหวนน้ำมันและเสื้อสูบ	
	มอเตอร์ร้อนเกินไป	ส่วนที่เสียดสีติดแน่น (รองลิ้น ลูกสูบ ฯลฯ)	เปลี่ยน
มอเตอร์เสีย		เปลี่ยน	
มอเตอร์ไม่มี เสียงหึ่ง (hum)		สายไฟฟ้าขาด	เปลี่ยน
		สวิทช์ความดันเสีย	เปลี่ยน
	มอเตอร์เสีย	ซ่อมที่โรงงานทำงานด้านมอเตอร์โดยเฉพาะ	
สตาร์ท เครื่อง ไม่ได้	ที่ป้องกันมอเตอร์ไม่ทำงาน	ขจัดสิ่งๆที่ทำให้ที่ป้องกันมอเตอร์ไม่ทำงาน และกดปุ่ม ให้มอเตอร์หมุน อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า	
	โวลท์ตก (สายไฟฟ้าเล็ก เกินไป)	ใช้สายไฟฟ้าที่กำหนด (ถ้าขนาดของแหล่งกำเนิด พลังงานเล็กเกินไป หรือการไฟฟ้า)	
	อากาศรั่วจากวาล์วเครื่องอัด	เอาคาร์บอนออก เปลี่ยนวาล์วถ้ารั่วมากหรือชำรุด	
	มอเตอร์มีเสียงหึ่ง	มอเตอร์เสีย	ส่งซ่อมที่โรงงานที่ทำงานด้านมอเตอร์โดยเฉพาะ

ตารางที่ 3.9 (ต่อ)

อาการ		สาเหตุ	วิธีการแก้ไข
สตาร์ท เครื่อง ไม่ได้	มอเตอร์ไม่มี เสียงหึ่ง	สายไฟฟ้าขาดในวงจรหรือรีเลย์ป้องกัน อุณหภูมิสูงทำงาน	เปลี่ยนสายไฟฟ้า อุณหภูมิห้องสูงเกินไป
		สวิตช์แม่เหล็กเสีย	เปลี่ยนสวิตช์แม่เหล็ก
		มอเตอร์ผิดปกติ	ซ่อมหรือเปลี่ยน
	มอเตอร์มี เสียงหึ่ง	โวลท์ตก	หาหรือการไฟฟ้าว่าขนาดของแหล่งกำเนิด พลังงานเล็กเกินไปหรือไม่
		ขนาดของสายไฟฟ้าในวงจรเล็กเกินไป	เปลี่ยนและใช้สายไฟฟ้าตามขนาดที่กำหนด
		มอเตอร์ผิดปกติ	ซ่อมหรือเปลี่ยน
	เครื่องอัดไม่หมุน	ถอดหรือตรวจเครื่องอัด	
ความดันขาออกของ เครื่องอัดต่ำ	ที่ลัดอัตรอัด วาล์วโซลินอยด์หรือ สวิตช์ความดันเสีย	ถอด ตรวจ ปรับหรือเปลี่ยน	
	ที่วัดความดันแสดงความดันไม่ถูกต้อง	เปลี่ยนที่วัดความดัน	
	ที่อรั้ว	ขันให้แน่นหรือเปลี่ยนที่กันรั้ว (packing)	
	ที่กรองอากาศอุดตัน	ทำความสะอาดหรือเปลี่ยน	
	อากาศรั่วจากที่กรองที่มีกรทำ ความสะอาดโดยอัตโนมัติ	ขันให้แน่นหรือเปลี่ยน	
ความดันสูงเกินระดับที่ กำหนด	ที่ลัดอัตรอัด วาล์วโซลินอยด์หรือ สวิตช์ความดันเสีย	ถอด ตรวจ ปรับ หรือเปลี่ยน	
	สลักเกลียวของที่ลัดอัตรอัดหลวม หรือที่กันรั้ว (packing) เสียหาย	ขันให้แน่นหรือเปลี่ยนที่กันรั้ว	
	ที่กันรั้วเชิงกลหัก	เปลี่ยน	
วาล์วรักษาความปลอดภัย ปล่อยลมออก	ความดันสูงกว่าที่กำหนด	ดูข้างบน	
	วาล์วรักษาความปลอดภัยตั้งไว้ ไม่ถูกต้อง หรือวาล์วเสีย	ปรับ ซ่อมหรือเปลี่ยน	
	ที่ลัดอัตรอัดทำงานผิดปกติ	ปรับ	
อุณหภูมิขาออกสูง	ที่กรองน้ำมันเครื่องอุดตัน	ทำความสะอาด	
	วาล์วควบคุมอุณหภูมิทำงานไม่ปกติ	เปลี่ยน	
	ที่หล่อเย็นอุดตัน	ทำความสะอาด	
	อุณหภูมิอากาศขาเข้าสูง หรือที่ กรองอากาศขาเข้าอุดตัน	ระบายอากาศในห้องให้ดี ทำความสะอาด ที่กรองอากาศขาเข้า	
ใช้น้ำมันเครื่องเปลี่ยนขึ้น	ระบบที่อรั้น้ำมันเครื่องกลับมาใช้อุดตัน	ทำความสะอาดหรือเปลี่ยนที่ capillary	
	ไส้ที่แยกน้ำมันเครื่องอุดตัน	เปลี่ยน	
น้ำมันเครื่องเสื่อมคุณภาพเร็ว	ใช้น้ำมันไม่ถูกต้อง	เปลี่ยนไปใช้น้ำมันที่ถูกต้อง	
	อุณหภูมิห้องสูง	ระบายอากาศในห้อง	
	มีน้ำปนอยู่ในน้ำมัน	ตรวจรูจุดและการระบายน้ำออก	
	มีน้ำมันเสื่อมคุณภาพอยู่ก่อน	ถ่ายและเปลี่ยนน้ำมัน	
มีเสียงผิดปกติจากเครื่องอัด	มีสิ่งแปลกปลอมอยู่ในเครื่องอัด	ถอดและซ่อม	
	รองล้นสึกหรอหรือชำรุด	ถอดและเปลี่ยนรองล้น	
มีเสียงผิดปกติอื่น	สลักเกลียวหรือตะปูควงหลวม	ขันให้แน่น	
	การติดตั้งไม่ถูกต้อง	ปรับให้อยู่ในแนวราบโดยใช้แผ่นโลหะบางหนุน	
มีเสียงผิดปกติจากสายพาน-V	สายพาน = V ลื่น	ปรับความตึงของสายพานหรือเปลี่ยนสายพาน	

เอกสารนี้เป็นเอกสารของบริษัทฯ ห้ามเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การทดสอบในที่ใช้งาน จะกล่าวถึงข้อควรระวังโดยทั่วไปเท่านั้นเนื่องจากรายละเอียดข้อแนะนำในการทดสอบมักมีอยู่ในคู่มือที่มาพร้อมกับเครื่อง

- ตรวจสอบทิศทางการหมุนของเครื่องอัด ให้มอเตอร์หมุนชั่วระยะเวลาสั้นๆ แล้วตรวจสอบว่ามอเตอร์หมุนไปในทิศทางที่กำหนดไว้โดยถูกสกรบนเครื่องหรือไม่เครื่องอัดอากาศเล็กๆ จะมีงานสายพานที่มีแผ่นใบพัดติดอยู่ด้วยเพื่อเป่าลมหล่อเย็นเครื่องอัดถ้าเครื่องอัดหมุนผิดทางพัดลมจะไม่ทำงานในการหล่อเย็นเครื่องอัดทำให้อุณหภูมิสูงขึ้นและอาจทำให้เกิดปัญหาอื่นๆ

- การทำงานขณะไม่มีภาระกรรม ต้องเดินเครื่องให้เข้าสภาพใช้งาน (Run In) เสียก่อน และเป็นโอกาสให้ได้ตรวจความผิดปกติเสียตั้งแต่เริ่มแรก ต้องให้เครื่องอัดทำงานโดยไม่มีภาระกรรมชั่วระยะเวลาที่กำหนด ในระหว่างนั้นต้องตรวจการสั่น เสียงและความร้อนที่รองถื่นแต่ละวัน เพื่อให้แน่ใจว่าไม่มีอะไรผิดปกติ

- การทำงานที่มีภาระกรรมบางส่วน ทำให้ความดันสูงขึ้นถึงระดับที่ต้องการได้โดยหรีวาล์วขาออก ต้องตรวจอุณหภูมิที่รองถื่นแต่ละอัน ความสั่นและเสียงจากแต่ละส่วน นอกจากนั้นต้องดูและบันทึกกระแสไฟฟ้าและข้อมูลอื่นในระหว่างการทำงานในสภาพมีภาระกรรมบางส่วนเพื่อใช้เปรียบเทียบและพิจารณาว่าเครื่องอัดทำงานผิดปกติหรือไม่

- การทดสอบอุปกรณ์ป้องกันอุบัติเหตุ หลังจากการทำงานที่ภาระกรรมบางส่วนแล้ว ควรทดสอบการทำงานของวาล์วรักษาความปลอดภัยและที่ลดอัตราการอัด (Unloader) เพื่อให้แน่ใจได้ว่าอุปกรณ์ดังกล่าวทำงานถูกต้องตามที่กำหนดไว้ในคู่มือที่มาพร้อมกับเครื่องอัด

- การตรวจตามลำดับ ควรรักษาให้ความดันขาออกอยู่ที่ระดับที่กำหนดแล้วตรวจอุณหภูมิที่จุดต่างๆ การสั่นเสียงผิดปกติ การรั่วจากท่อ ความหลวมของชิ้นส่วน ตามลำดับ

- การหยุดเครื่อง ลำดับการกระทำเพื่อหยุดเครื่องนั้นสำคัญเท่ากับลำดับการกระทำเมื่อเดินเครื่อง ถ้าคำนึงถึงชีวิต การใช้งานของเครื่อง ลำดับการกระทำเพื่อหยุดเครื่อง มีดังต่อไปนี้

1. ตั้งเครื่องอัดที่จุดที่ไม่มีภาระกรรมและปิดวาล์วน้ำหล่อเย็น
2. ปลดปล่อยให้เครื่องทำงาน 2-3 นาทีในสภาพ ข้อ. 1) การกระทำนี้เพื่อกันมิให้น้ำควบแน่น

ในเสื่อสูบ

3. หยุดมอเตอร์ เปิดวาล์วน้ำทิ้งและวาล์วปล่อยอากาศ และให้น้ำหล่อเย็นไหลออกหมด
4. เมื่ออุณหภูมิของน้ำหล่อเย็นที่ทางออกลดถึงระดับอุณหภูมิห้องแล้วก็หยุดน้ำที่ป้อนเข้าที่

หล่อเย็นหลักการอัดได้และปล่อยน้ำหล่อเย็นออกให้หมด

5. ปล่อยน้ำจากที่แยกน้ำ และจากที่หล่อเย็นหลังจากการอัดและถึงรับลม

6. ปล่อยอากาศอัดออกจากห้องจ่ายลม เพื่อป้องกันมิให้น้ำในท่อขาออกถูกส่งกลับเข้ามาใน

เอกสารเสื่อสูบ เอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.2.1.14 การทำงานประจำวัน

ข้อควรระวังเป็นพิเศษในการทำงานประจำวันมีดังนี้

1. มีการบันทึกลงสมุดบันทึกการทำงานทุกวัน ข้อมูลที่ต้องบันทึก อุณหภูมิที่จุดต่างๆ ความดันปริมาณ การใช้น้ำมันเครื่องรถร้วของอากาศยานน้ำมันหรือน้ำ การเปลี่ยนแปลงในเสียงและการสั่น ฯลฯ
2. วาล์วรักษาความปลอดภัย นั้นลองให้ทำงาน (ใช้มือ) วันละครั้ง
3. ต้องปล่อยน้ำออกจากถังเก็บลมและถังแยกน้ำมันในเครื่องอัดแบบเกลียววันละสองครั้ง
4. ตรวจสอบให้แน่ใจว่าการเคลื่อนที่ของเข็มที่วัดความดันนั้นเรียบ ไม่กระตุกและชี้ใกล้ศูนย์ ความดันในถังเป็นศูนย์
5. ตรวจสอบให้แน่ใจโดยดูจากที่วัดความดันว่าวาล์ว ควบคุมความดันและสวิตช์ ความดันทำงานภายในช่วงความดันที่กำหนด

### 3.2.15 เครื่องอัดที่ไม่ได้ใช้งานเป็นเวลานาน

การไม่ใช้เครื่องอัดเป็นเวลานานนั้น อาจดูเหมือนว่าเครื่องอัดได้พักแต่ที่จริงอาจเกิดความเสียหายได้มากเช่น การเป็นสนิม การมีฝุ่นเกาะ การเปลี่ยนในคุณภาพน้ำมัน ความชื้น ความแน่นเป็นน้ำ การกัดกร่อน เนื่องจากก๊าซไม่บริสุทธิ์ ฯลฯ ดังนั้นถ้าเครื่องอัดไม่ได้รับการดูแลอย่างเหมาะสมในระหว่างที่ไม่ได้ใช้งาน เมื่อใช้งานเข้าจะเกิดปัญหาต่างๆ

ต้องปฏิบัติดังต่อไปนี้ถ้าไม่ใช้เครื่องอัดอย่างน้อยหนึ่งเดือน

1. กันฝุ่น : ถ้ามีฝุ่นมาก ควรมีที่คุมที่ทำด้วย Vinyl คลุมวาล์วที่เปิดให้ลมเข้าออกจากฐานเครื่อง ส่วนกันร้วของเพลลา ฝาปิดวาล์ว เครื่องสูบน้ำมันเครื่อง อุปกรณ์วัด ฯลฯ
2. ถอดและเก็บ : ถ้าเป็นไปได้ควรอุปกรณ์วัดออกเก็บเสีย
3. ท่อลม : วาล์วต้องปิดสนิทเพื่อไม่ให้ฝุ่น หรือดินเข้าได้
4. การป้องกันสนิม : ใช้น้ำมันกันสนิมหรือจาระบีทาชิ้นส่วนภายในเครื่องอัด
5. หมุนด้วยมือ : เมื่อไม่ใช้เครื่องอัดควรหมุนด้วยมือเดือนละหนึ่งครั้ง เพื่อป้องกันสนิม และเพื่อจ่ายน้ำมันหล่อลื่นไปทั่วๆ ถ้าเครื่องอัดต่อกับมอเตอร์อยู่ก็ควรให้ทำงานวันละ 10 นาที ทุกวันโดยไม่มีภาระกรรม แทนที่จะใช้วิธีใช้น้ำมันเคลือบกันสนิม
6. แหล่งต้นพลัง : ถ้าจะไม่ใช้เครื่องอัด : เป็นเวลานานมาก ควรใส่กุญแจสวิตช์ทุกอันไว้เพื่อไม่ให้มีการเดินเครื่องโดยไม่ได้ตั้งใจ

### 3.2.16 การซ่อมบำรุงรักษาและตรวจ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ได้อ่านมาแล้ว เครื่องอัดมีหลายชิ้นส่วนที่ได้รับแรงกระแทกและมีชิ้นส่วนที่เสียดสีกับชิ้นส่วนอื่นในขณะที่ได้รับความดันสูง นอกจากนั้นการเกิดการสั่นและการแปรเปลี่ยนในความดันก็เป็นสิ่งที่หลีกเลี่ยงไม่ได้ ดังนั้นเพื่อให้ใช้เครื่องอัดได้เป็นระยะเวลายาวนานโดยเครื่องอยู่ในสภาพดี

การเดินเครื่องอย่างถูกต้องตลอดจนการซ่อมบำรุงรักษาและการตรวจอย่างดีเป็นสิ่งจำเป็นจะต้องทำ ต้องปฏิบัติตามหนังสือคู่มือที่มากับเครื่องในที่นี่จะกล่าวถึงข้อแนะนำขั้นพื้นฐานเท่านั้น โดยจะใช้ สองตัวอย่างคือ เครื่องอัดประเภทลูกสูบขนาดเล็กหล่อลื่นโดยใช้น้ำมัน และเครื่องอัดประเภท เกลียวขนาดเล็กหล่อลื่นโดยใช้น้ำมันเครื่องทั้งสองประเภท มีการผลิตขายกันเป็นจำนวนมากทั้งในปัจจุบันและอนาคต

### 3.2.1.17 การตรวจทุกวัน

ก่อนการใช้งานในแต่ละวัน ต้องตรวจเครื่องอัดตามตารางที่ 3.10

ตารางที่ 3.10 ตารางของการตรวจประจำวัน

ลำดับที่	เรื่องที่ต้องตรวจ	วิธีตรวจ
1	ระดับน้ำมันหล่อลื่น	รักษาให้ระดับน้ำมันอยู่ในวงกลมสีแดงบนที่วัดระดับน้ำมัน เติมน้ำมันเมื่อระดับต่ำกว่าที่กีดล่าง
2	ระบายน้ำทิ้ง	เปิดวาล์วระบายน้ำทิ้งจากถังเก็บลม (ระบายน้ำทิ้งได้ง่าย ถ้าความดันใน ถังเก็บลมเท่ากับ 0.5 – 1.0 กก/ซม. <sup>2</sup> (0.05 – 0.1 MPa))
3	การทำงานของที่วัดความดัน	ตรวจเพื่อให้แน่ใจได้ว่าเข็มของที่วัดความดันเคลื่อนไหวอย่างเรียบร้อย ไม่กระตุก และเข็มชี้ที่จุดเกือบสูญเมื่อความดันในถังเท่ากับสูญ
4	ความดันในระหว่างการใช้งาน ของวาล์วควบคุมความดัน	ตรวจที่วัดความดันเพื่อให้แน่ใจว่าในระหว่างการทำงานนั้นความดัน อยู่ในระหว่างเกณฑ์ที่กำหนด
5	ความดันในระหว่างการใช้งาน ของสวิตซ์ความดัน	
6	การทำงานของวาล์วรักษา ความปลอดภัย	ดึงก้าน (spindle) ของวาล์วรักษาความดันเบา ๆ ที่ความดันสูงสุด (มีเครื่องหมายเป็นเส้นแดงบนที่วัดความดัน) และตรวจการทำงาน
7	อื่น ๆ	ตรวจให้แน่ใจได้ว่าไม่มีเสียงผิดปกติหรือการสั่นผิดปกติ

### 3.2.1.18 การตรวจประจำ

เครื่องอัดต้องได้รับการตรวจเป็นระยะอย่างสม่ำเสมอเพื่อให้ใช้งานได้ดีเป็นเวลานาน

กระบวนการตรวจประจำมีอยู่ในตารางที่ 3.10 สำหรับเครื่องอัดประเภทลูกสูบขนาดเล็กหล่อลื่น โดยใช้น้ำมันและในตารางที่ 3.10 สำหรับเครื่องอัดประเภทเกลียวขนาดเล็กหล่อลื่นโดยใช้น้ำมัน แต่ ใ้แม้ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น ผู้กั้ทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการแก้ไข ระยะเวลาระหว่างการตรวจประจำนั้นขึ้นอยู่กับเครื่องอัดแต่ละ Model ดังนั้นควรใช้ตารางเป็นหลัก การเท่านั้นส่วนรายละเอียดต้องเป็นไปตามหนังสือคู่มือที่มากับเครื่องอัด

### 3.2.1.19 กระบวนการตรวจ

จะได้กล่าวถึงมาตรฐานการยกเครื่องซ่อมใหญ่ การตรวจและการควบคุม นอกจากนี้ผู้ที่มาทำงานยกเครื่องซ่อมใหญ่และทำการตรวจต้องมีความชำนาญและประสบการณ์เฉพาะดังนั้นต้องกระทำโดยบริษัทที่รับทำงานด้านนี้หรือโดยช่างเทคนิคที่มีประสบการณ์เป็นอย่างดี

ข้อควรระวังทั่วไปในระหว่างการยกเครื่องซ่อมใหญ่และการประกอบมีดังต่อไปนี้

1. เมื่อจะถอดเครื่องออกเพื่อซ่อม ต้องปิดสวิตซ์ตัดกระแสไฟฟ้าและปล่อยอากาศอัดออกจากถัง
2. ชิ้นส่วนที่ถอดออกมาแล้วต้องได้รับการเรียงเป็นลำดับ บนกล่องใส่ชิ้นส่วน หรือบนกระดาษเพื่อความสะดวก และเพื่อป้องกันมิให้ประกอบชิ้นส่วนผิด
3. แผ่นกันรั่วหรือวงแหวนที่เสียแล้ว จะใช้อีกไม่ได้ต้องเปลี่ยนใหม่
4. เมื่อใช้น้ำมันที่ติดไฟง่าย ในการทำความสะอาด ต้องเช็ดชิ้นส่วนให้แห้งสนิทก่อนการประกอบ ควรใช้น้ำยาขจัดคราบคาร์บอนที่เกิดจากน้ำมันหล่อลื่น
5. ต้องระวังอย่างย่งอย่าให้ลูกสูบ วาล์วเสียดูด และชิ้นส่วนเสียดสีต่างๆ ต้องเสียดายเช่น เกิดรอยขีดข่วน
6. ขณะประกอบ ต้องชโลมชิ้นส่วนเสียดสีด้วยน้ำมันหล่อลื่นที่กำหนด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.29 เครื่องอัดอากาศที่นำมาใช้ในการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.2.2 อุณหภูมิและเครื่องมือวัดอุณหภูมิ

#### 3.2.2.1 อุณหภูมิและมาตราวัดอุณหภูมิ

หน่วยวัดและมาตราวัดอุณหภูมิ(Temperature Units and Temperature Scales)

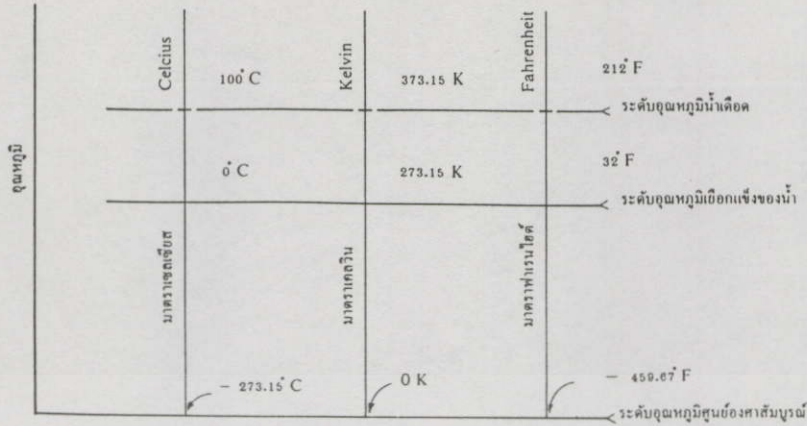
อุณหภูมิเป็นหน่วยมูลฐานที่สำคัญ และใช้มากที่สุดค่าหนึ่งในอุตสาหกรรม หน่วยของอุณหภูมิที่ใช้ในปัจจุบันมีหลายหน่วยด้วยกันที่สำคัญคือ เซลเซียส (Celsius), เคลวิน (Kelvin), ฟาเรนไฮต์ (Fahrenheit)

เซลเซียส เป็นหน่วยวัดอุณหภูมิที่ตั้งชื่อตามนักวิทยาศาสตร์ชาวสวีเดน Anders Celsius (1701-1744) โดยเซลเซียส พบว่า ณ ความดันบรรยากาศน้ำบริสุทธิ์จะมีจุดที่ทางอุณหภูมิอยู่สองจุดคือ จุดเยือกแข็งของน้ำและจุดที่น้ำเดือด เขาจึงได้กำหนดจุด 0 องศาที่จุดเยือกแข็งของน้ำและ 100 องศาที่จุดเดือดของน้ำ

ฟาเรนไฮต์ เป็นหน่วยวัดอุณหภูมิที่ตั้งชื่อตามนักวิทยาศาสตร์ชาวคัทซ์ Daniel Gabriel Fahrenheit (1686-1736) โดยฟาเรนไฮต์ พยายามหาจุดต่ำสุดของอุณหภูมิโดยการทดลองกับสารต่างๆหลายๆอย่าง และพบว่าจุดเยือกแข็งของแอมโมเนียมคลอไรด์ เป็นจุดต่ำสุดของอุณหภูมิเท่าที่ทดลองได้ จึงกำหนดจุดนี้เป็นจุด 0 องศา ส่วนจุดบนของสเกลนั้น เขาพบว่าอุณหภูมิของร่างกายมนุษย์ เป็นจุดอุณหภูมิคงที่ จึงกำหนดจุดนี้เป็น 98 องศา สาเหตุที่ไม่กำหนดจุดบนของสเกลเป็น 100 องศา เพราะต้องการให้มีค่าเป็นสัดส่วนที่คูณของ 12 ตามหน่วยอื่นๆ ที่นิยมในสมัยนั้น

ทั้งหน่วยเซลเซียสและฟาเรนไฮต์ก็เป็นมาตราวัดอุณหภูมิที่ได้จากการทดลองหาสภาวะคงที่ทางอุณหภูมิของสารจุดต่างๆ ซึ่งอยู่ในย่านบรรยากาศของพื้นโลกและแบ่งสเกล ให้เป็นไปตามความสะดวกเหมาะสมไม่มีหลักเกณฑ์ตายตัวอะไร ต่อมานักวิทยาศาสตร์ชาวอังกฤษลอร์ดเคลวิน เป็นผู้ค้นคิดหน่วยของอุณหภูมิทางวิทยาศาสตร์ขึ้นในปี 1851 เรียกตามมาตราเคลวิน โดยกำหนดอุณหภูมิศูนย์สัมบูรณ์ (Zero Absolute Temperature) ขึ้น ณ จุดที่เป็น Ideal นี้ อีเล็กตรอนในอะตอมของสารต่างๆ จะหยุดโคจรรอบนิวเคลียสโดยไม่มีพลังงานความร้อนหลงเหลืออยู่ในสารนั้นๆ อีกต่อไป ในทางปฏิบัติไม่สามารถทำให้เย็นจัดถึงจุดนี้ได้ (กำหนดได้จากการคำนวณ) และแบ่งช่วงของมาตราตามมาตราเซลเซียส ระบบหน่วยสากล (The System International d'Unites) ซึ่งเรียกย่อๆว่า SI ได้กำหนดหน่วยสากลของอุณหภูมิเทอร์โมไดนามิก เป็นมาตราเคลวิน และหน่วยของอุณหภูมิต่างๆไปเป็นเซลเซียส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 1.1 แสดงการเปรียบเทียบอุณหภูมิทั้ง 3 มาตรา

เปรียบเทียบจุดอ้างอิง (reference) ของมาตราต่างๆ

จุดศูนย์สัมบูรณ์	= - 273.15 °C	= - 459.67 °F	= 0 K
จุดเยือกแข็งของน้ำ	= 0 °C	= 32 °F	= 273.15 K
จุดเดือดของน้ำ	= 100 °C	= 212 °F	= 373.15 K

สูตรการเปลี่ยนมาตราเซลเซียสและฟาเรนไฮต์เป็นมาตราเคลวิน

$$\begin{aligned} \dots K &= \dots ^\circ C + 273.15 \\ \dots K &= \frac{5}{9} (F - 32) + 273.15 \end{aligned}$$

รูปที่ 3.30 แสดงการเปรียบเทียบอุณหภูมิทั้ง 3 มาตรา

### 3.2.2.2 อุณหภูมิอ้างอิงมาตรฐาน (Reference Temperatures)

มาตราสากลของอุณหภูมิในทางปฏิบัติ (International Practical Temperature Scale) ได้ถูกกำหนดขึ้นโดยที่ประชุมของกลุ่มประเทศผู้นำทางอุตสาหกรรมในปี 1968 และเป็นที่ยอมรับกันทั่วไปไปเรียกโดยย่อว่า IPTS 68 ได้กำหนดจุดอ้างอิงมาตรฐานของอุณหภูมิ (Reference Temperature) เพิ่มเติมขึ้นอีกหลายจุดโดยกำหนดจากจุดเยือกแข็งหรือจุดไตรภาค (Triple Point) ซึ่งเป็นจุดที่มีสถานะคงที่ทางอุณหภูมิของสารต่างๆ เพราะเมื่อวิหยาการเจริญมากขึ้นความต้องการอุณหภูมิอ้างอิง (Reference Temperature) ณ จุดที่สูงกว่าจุดเดือดของน้ำต่ำกว่าจุดเยือกแข็งของน้ำก็มีมากขึ้น

IPTS 68 ได้กำหนดมาตราของอุณหภูมิมาตรฐานขึ้น 2 มาตรา คือ เซลเซียส และเคลวิน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

EQUILIBRIUM POINT (จุดที่มีสภาวะคงที่ทางอุณหภูมิจน)	K	°C
จุดไตรภาคของไฮโดรเจน	13.81	- 259.34
จุดสมมูลในสภาวะก๊าซและของเหลวของไฮโดรเจน ที่ความดัน 25/76 ของความดันบรรยากาศ	17.042	- 256.108
จุดเดือดของไฮโดรเจน	20.28	- 252.87
จุดเดือดของนีออน	27.102	- 246.048
จุดไตรภาคของออกซิเจน	54.361	- 218.789
จุดเดือดของออกซิเจน	90.188	- 182.962
จุดไตรภาคของน้ำบริสุทธิ์	273.16	0.01
จุดเดือดของน้ำบริสุทธิ์	373.15	100
จุดแข็งตัวของสังกะสี	692.73	419.58
จุดแข็งตัวของเงิน	1,235.08	961.93
จุดแข็งตัวของทอง	1,337.58	1,064.43
จุดแข็งตัวของดีบุก	505.1181	231.9681

อุณหภูมิของสาร ณ จุดต่าง ๆ ที่กล่าวมานี้จะใช้เป็นจุดอ้างอิงมาตรฐาน (references) ในการสอบเทียบค่า  
สากลของเครื่องมือวัดอุณหภูมิ  
(หมายเหตุ: ขนาดความคลาดเคลื่อนไม่ต้องเขียน ... K ให้กำหนดอักษร K ตามหลัง เช่น 273.15 K)

### 3.2.2.3 หลักการวัดอุณหภูมิ

เครื่องมือวัดอุณหภูมิมียุคหลายชนิด โดยเครื่องมือแต่ละชนิดอาศัยหลักการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติเฉพาะของสารคือ จะต้องมีการเปลี่ยนแปลงที่วัดได้ เมื่ออุณหภูมิที่วัดเปลี่ยนแปลงไป และการเปลี่ยนแปลงที่วัดได้จะต้องคงที่แน่นอนและพิถีพิถันได้

หลักการวัดอุณหภูมิโดยอาศัยการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางเชิงกล

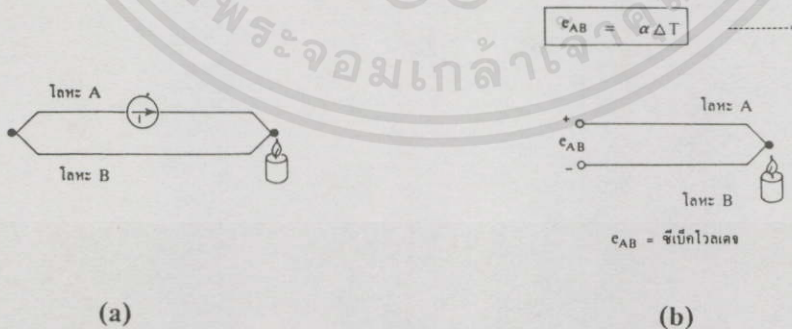
เทอร์โมมิเตอร์	หลักการวัด	วัสดุที่ใช้	ช่วงการวัด
ใช้ของเหลวบรรจุในหลอดแก้วปิด (thermo-meter)	$\Delta$ อุณหภูมิ $\rightarrow$ เทอร์โมมิเตอร์ $\rightarrow \Delta$ การขยายตัวของของเหลว	ปรอท แอลกอฮอล์	- 130 ถึง 315°C [- 200 ถึง 600°F]
เปลี่ยนการขยายตัวเป็นความดัน (Filled Thermal)	$\Delta$ อุณหภูมิ $\rightarrow$ เทอร์โมมิเตอร์แบบ Filled Thermal $\rightarrow \Delta$ ความดัน $\rightarrow \Delta$ ปริมาตร	ปรอท แอลกอฮอล์	- 185 ถึง 540°C [- 300 ถึง 1000°F]
แบบแถบโลหะคู่	$\Delta$ อุณหภูมิ $\rightarrow$ ตัววัด Bimetal $\rightarrow \Delta$ ระยะทาง	INVAR-Ni + Fe + Cr.	- 60 ถึง 425°C [- 30 ถึง 800°F]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เทอร์โมมิเตอร์	หลักการวัด	วัสดุที่ใช้	ช่วงการวัด
เทอร์โมคัปเปิล	$\Delta$ อุณหภูมิ $\rightarrow$ เทอร์โมคัปเปิล $\rightarrow \Delta$ แรงเคลื่อนไฟฟ้า	-type B - S - R - K - E - J - T	600 ~ + 1,700° C 0 ~ + 1,800° C 0 ~ + 1,600° C -200 ~ + 1,200° C -200 ~ + 800° C -200 ~ + 800° C -200 ~ + 350° C
อาร์ทีซี	$\Delta$ อุณหภูมิ $\rightarrow$ RTD $\rightarrow \Delta$ ความต้านทาน	แพลตินัม Pt นิกเกิล ทองแดง	-258 ~ 900° C -150 ~ 300° C -200 ~ 120° C
เทอร์มิสเตอร์	$\Delta$ อุณหภูมิ $\rightarrow$ เทอร์มิสเตอร์ $\rightarrow \Delta$ ความต้านทาน	เทอร์มิสเตอร์	-30 ~ 300° C

### 3.2.2.4 เทอร์โมคัปเปิล (Thermocouples)

ความเป็นมา ในปี ค.ศ 1821 นักวิทยาศาสตร์ชาวเยอรมัน Thomas Seebeck พบว่า เมื่อนำลวดโลหะ 2 เส้นที่ทำด้วยโลหะต่างชนิดกันมาเชื่อมต่อปลายทั้งสองเข้าด้วยกัน ถ้าปลายจุดต่อทั้งสองมีอุณหภูมิต่างกัน จะเกิดกระแสไฟฟ้าไหลในวงจรเส้นลวดทั้งสองนี้ตามรูป 3.31 (a) ปริมาณการไหลของกระแสไฟฟ้านี้จะเปลี่ยนแปลงไปตามผลต่างของอุณหภูมิที่ปลายจุดต่อทั้งสอง และถ้าเปิดปลายจุดต่อด้านหนึ่งออก จะทำให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าขึ้นที่ปลายด้านเปิด แรงเคลื่อนไฟฟ้านี้เรียกว่า “ซีเบ็ค โวลเตจ”



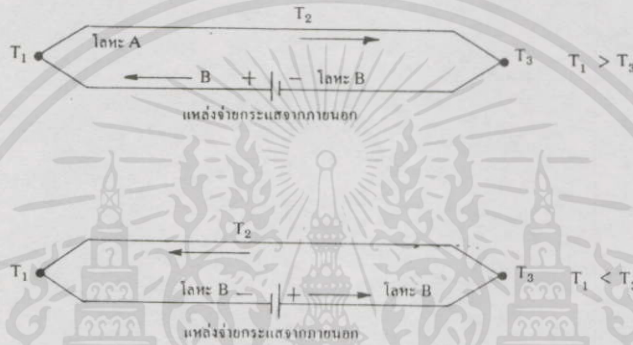
รูปที่ 3.31 (a) (b) แสดงวงจรการทดลองของซีเบ็ค

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ  $\alpha$  คือค่าสัมประสิทธิ์ของซีเบ็ค (Seebeck Coefficient) เป็นค่าคงที่มีหน่วยเป็น volt/K  
 $\Delta T$  คือผลต่างของอุณหภูมิและ  $e_{AB}$  คือแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่วัดได้

ต่อมาในปี 1834 นักวิทยาศาสตร์ Jean C.A. Peltier พบว่าเมื่อผ่านกระแสไฟฟ้าเข้าไปใน วงจรลักษณะเดียวกับที่ซีเบ็คสร้างขึ้นจะทำให้เกิดอุณหภูมิที่ปลายทั้งสองของจุดต่อแตกต่างกัน

โดยปลายข้างหนึ่งจะร้อนขึ้นและปลายอีกข้างหนึ่งจะเย็นลง วงจรการทดลองของเพลเทียร์ เป็นดังรูปที่ 3.32 ลวดทั้งสองทำจากบิสมัท และแอนติโมนี



รูปที่ 3.32 แสดงวงจรการทดลองของเพลเทียร์

เมื่อมีกระแสจากแหล่งจ่ายภายนอกไหลผ่านเข้าไปในวงจร จะทำให้ปลายข้างขวามี อุณหภูมิสูงขึ้นและปลายข้างซ้ายมีอุณหภูมิลดลง ในทางกลับกันเมื่อเปลี่ยนทิศทางการไหลของ กระแสก็จะทำให้อุณหภูมิที่ปลายจุดต่อทั้งสองกลับกันด้วย

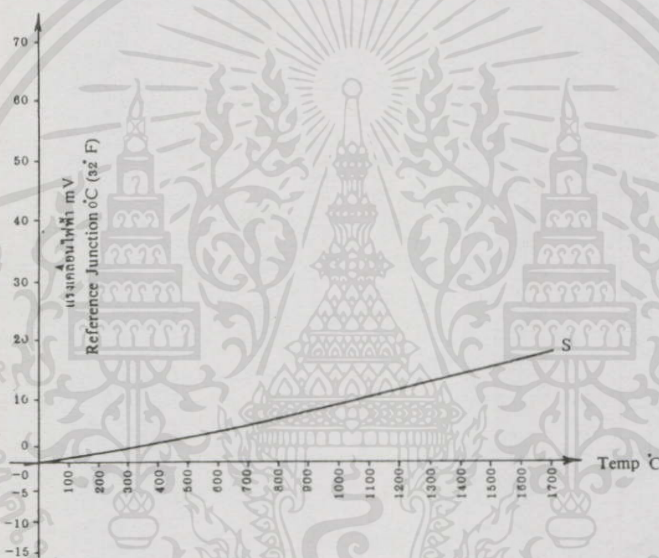
จากการค้นพบของซีเบ็คและเพลเทียร์ การศึกษาค้นพบของซีเบ็คและเพลเทียร์ การศึกษาค้นคว้าเกี่ยวกับเทอร์โมคัปเปิลได้ดำเนินต่อมา จนเป็นเครื่องวัดอุณหภูมิใช้อย่างกว้างขวางในวงการ อุตสาหกรรม เช่นในปัจจุบัน

นับตั้งแต่ซีเบ็ค ได้ค้นพบหลักการวัดอุณหภูมิด้วยเทอร์โมคัปเปิลในปี 1821 เป็นต้นมา รายละเอียดในหลักการได้ถูกพัฒนาให้ก้าวหน้าเหมาะสมที่จะนำมาใช้ในงานอุตสาหกรรมมาโดยตลอด และได้เกิดเทอร์โมคัปเปิลแบบมาตรฐานขึ้นหลายชนิด เพื่อให้เหมาะสมกับการใช้งานในลักษณะ ต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.2.2.5 เทอร์โมคัปเปิลแบบ S (Type S Platinum 10% Rhodium V.S. Platinum)

ในปี 1886 Le Chatelier ได้ประดิษฐ์เทอร์โมคัปเปิล โดยสายลวดทำจาก พลาตินัม และสายลวดทำจากโลหะผสม 90% ของพลาตินัม + 10% ของโรเดียม สามารถวัดอุณหภูมิได้สูงถึง 1400 °C ซึ่งต่อมาเทอร์โมคัปเปิลแบบนี้ได้กลายเป็นแบบ S,มาตรฐานสากลตาม IPTS68 ระบุว่าสามารถใช้ในการสอบเทียบค่า และเปรียบเทียบเป็นค่ามาตรฐาน(Calibration And Comparison.) ตั้งแต่จุดแข็งตัวของ แอนติโมนี (630.74 °C) จนถึงจุดแข็งตัวของทอง( 1064.43 °C) ตามกราฟแสดงรูปที่ 3.33 คุณสมบัติของเทอร์โมคัปเปิลแบบ S



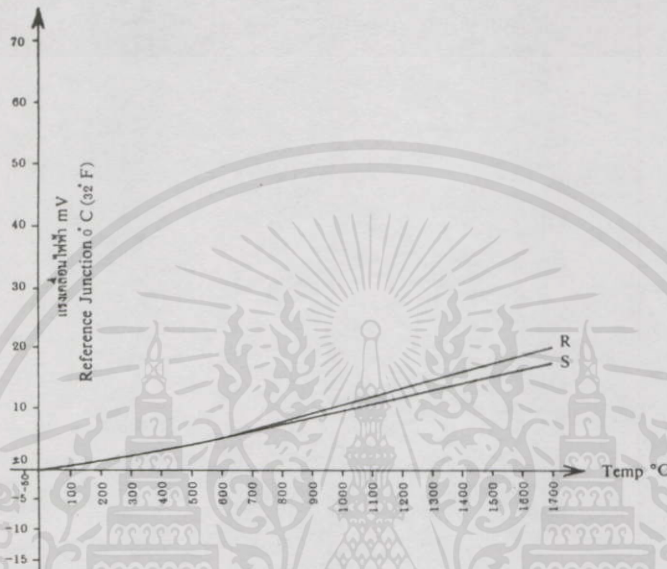
รูปที่ 3.33 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของแรงเคลื่อนไฟฟ้ากับอุณหภูมิของเทอร์โมคัปเปิลแบบ S

เทอร์โมคัปเปิลแบบ S นี้สามารถใช้งานในสภาวะที่เป็น Oxidizing และ Inert ได้ดี โดยสามารถทนอุณหภูมิได้ถึง 1400 °C หรือกับการใช้งานในระยะเวลาดสั้นๆ สามารถทนได้ถึง 1482 °C แต่ไม่เหมาะสำหรับสภาวะงานที่เป็นแบบ Reducing, Vacuum หรือสภาพการดำเนินงานที่มีไอโลหะ เช่น ตะกั่ว, สังกะสี และไอของโลหะ เช่น อาเซนิก, ซัลเฟอร์, ฟอสฟอรัสซึ่งจะทำให้มีอายุการใช้งานที่สั้นลง ถ้าจำเป็นให้มีอายุการใช้งานสั้นลง ถ้าจำเป็นต้องใช้งานจะต้องป้องกันด้วย Protecting Tube ที่เป็นแบบอโลหะเช่น อลูมินาบริสุทธิ์ ที่อุณหภูมิสูงๆ เมื่อกำหนดของพลาตินัมจะพองตัว ไม่ว่าจะชนิดใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีให้คดเปล่งเนื้อหา และต้องระวังองศาของอุณหภูมิทุกครั้งที่มีการนำไปใช้ และพลาตินัมก็จะเกิดสกปรก (Contamination) ได้ง่ายที่อุณหภูมิสูงๆ ทำให้เกิดแรงการเคลื่อนที่ของไฟฟ้ามีค่าที่ต่ำลง จากการวิเคราะห์ส่วนวัสดุประกอบ (Composite) ภายหลังการใช้งาน 20 ปี ส่วน

ประสม โรเดียมจะเปลี่ยนสภาพเป็น พาราเดียมทำให้มีคุณสมบัติผิดไป การเปลี่ยนสภาพเช่นนี้ จะเกิดกับเทอร์โมคัปเปิลทุกแบบที่มีส่วนผสมของโรเดียม

### 3.2.2.6 เทอร์โมคัปเปิลแบบ R (Type R Platinum 13% Rhodium)

เทอร์โมคัปเปิลแบบ R สายบวกทำจาก พลาตินัม สายลบทำจาก พลาตินัม 87% + โรเดียม 13% ผลที่ได้จะทำให้แบบ R ให้เอาที่พุ่มสูงกว่าแบบกราฟแสดงคุณสมบัติเปรียบเทียบกันแบบ S



รูปที่ 3.34 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของแรงเคลื่อนไฟฟ้ากับอุณหภูมิของเทอร์โมคัปเปิลแบบ R

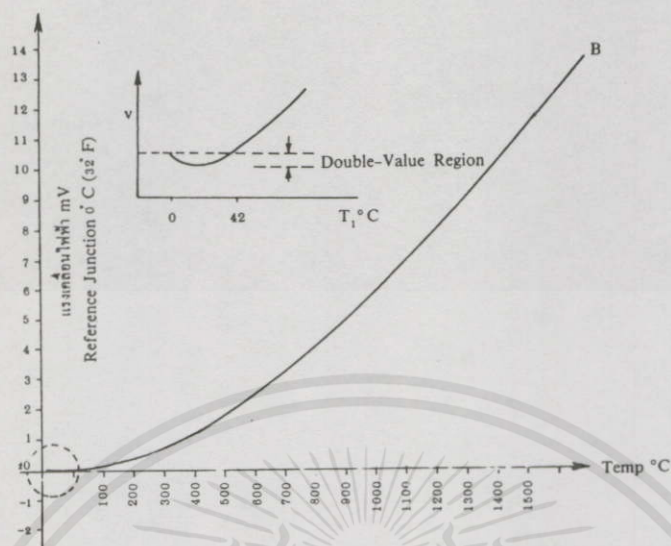
คุณสมบัติเหมือนกันแบบ S ทนอุณหภูมิสูงสุดได้ 1400 °C

### 3.2.2.7 เทอร์โมคัปเปิลแบบ B (Type B Platinum 30 % Rhodium/Platinum 6% Rhodium)

ผลิตครั้งแรกเมื่อปี 1954 ในประเทศเยอรมัน สายบวกทำจากพลาตินัม 70 % + โรเดียม 30 % ,สายลบทำจากพลาตินัม 94 % + โรเดียม 6% คุณสมบัติของเทอร์โมคัปเปิลแบบ B ตามกราฟที่แสดง

เทอร์โมคัปเปิลแบบ B จะให้แรงเคลื่อนที่ต่ำกว่าแบบ S และแบบ R แต่คุณภาพที่เด่นกว่าคือแข็งแรงและทนทานกว่า สามารถใช้งานที่อุณหภูมิสูงได้ถึง 1704 °C (3100°F) ในสภาวะที่เป็น Oxidizing หรือ Inert แต่ไม่เหมาะสมกับการใช้งานในสภาวะ Reducing หรือ Vacum และในงานที่มีไอของโลหะ และโลหะเช่นเดียวกับแบบ R และ S (เทอร์โมคัปเปิลที่ทำจากธาตุบริสุทธิ์จะให้ลิเนียร์ดี แต่ให้แรงเคลื่อนไฟฟ้าค่อนข้างต่ำ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



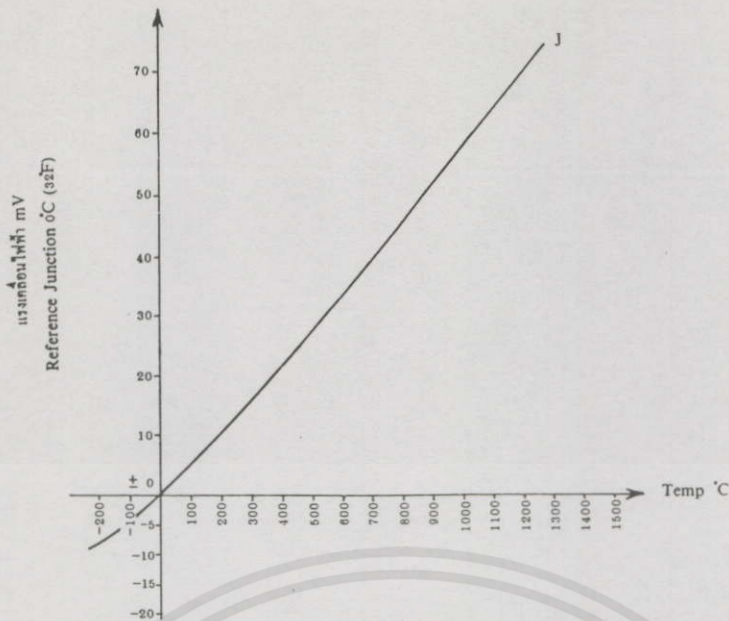
รูปที่ 3.35 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของแรงเคลื่อนไฟฟ้ากับอุณหภูมิของเทอร์โมคัปเปิลแบบ B

### 3.2.2.8 เทอร์โมคัปเปิลแบบ J (Type J V.S. Constantan)

เนื่องจากพลาคินัมเป็นธาตุที่มีราคาแพง เพื่อที่จะทำให้เทอร์โมคัปเปิลมีราคาถูกได้มีการค้นคว้าหาวัสดุที่มีราคาถูกกว่าเพื่อใช้แทนการพลาคินัม วัสดุที่เริ่มทดลองใช้เหล็ก นิกเกิล นิกเกิล-บริสทุธิ์ เพราะมากในสภาพการใช้งานที่เป็น Oxidizing การทดลองต่อมาพบว่าโลหะผสมระหว่าง 60% ของทองแดง+40%ของนิกเกิล ที่ต่อมาเรียกว่า คอนสแตนแตน(Constantan) สามารถแก้ปัญหานี้ได้ เทอร์โมคัปเปิลที่ใช้สายบวกทำด้วยเหล็ก และสายลบทำด้วย คอนสแตนแตน(Constantan) จึงถือกำเนิดขึ้น และต่อมาเป็นแบบมาตรฐานแบบ J

คุณสมบัติของเทอร์โมคัปเปิลแบบ J เหมาะสมสำหรับสภาพที่มีการใช้งานที่เป็นของ Vacuum, Oxidizing, Reducing หรือ Inert ที่อุณหภูมิไม่เกิน 760 °C ไม่เหมาะสมสำหรับสภาพการใช้งานที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า 0°C และที่อุณหภูมิสูงกว่า 538 °C (1000°F) สายที่เป็นเหล็กจะเกิด Oxidizaion ด้วยอัตราสูงกว่าปกติมาก สำหรับอุณหภูมิที่สูงกว่า 538 °C จะต้องใช้สายเทอร์โมคัปเปิลขนาดใหญ่จะต้องช่วยอายุการใช้งานขึ้นยาวขึ้น จากการทดลองใช้งานภายใน 20 ปี พบว่าส่วนผสมของโลหะเทอร์โมคัปเปิลจะเปลี่ยนไป 0.5%(แมงกานีสเพิ่มขึ้นในเนื้อเหล็ก)

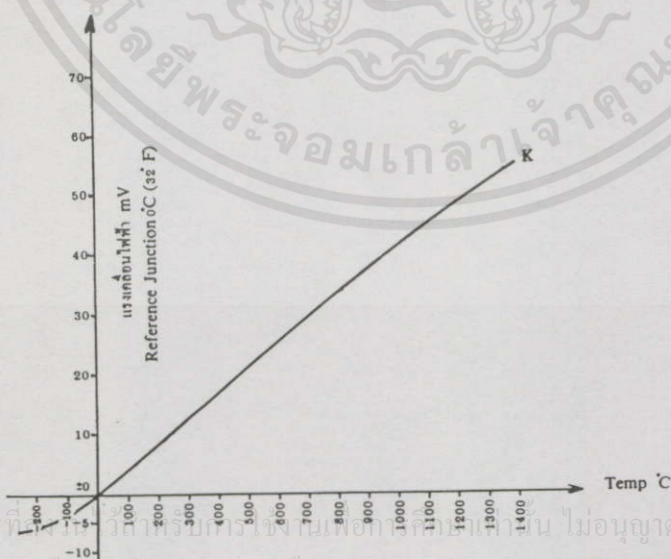
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.36 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของแรงเคลื่อนไฟฟ้ากับอุณหภูมิของเทอร์โมคัปเปิลแบบ J

### 3.2.2.9 เทอร์โมคัปเปิลแบบ K (Type K Chromel V.S. Aiumel)

เพื่อที่จะทำให้เทอร์โมคัปเปิลสามารถวัดอุณหภูมิได้สูงกว่าแบบ J และมีราคาถูกกว่าจึงได้มีผู้ประดิษฐ์เทอร์โมคัปเปิลแบบใหม่ที่สายบวกทำจากโลหะผสมระหว่าง นิกเกิล 10%+โครเมียม 90% และสายลบทำจากโลหะผสมระหว่าง นิกเกิล 95%+5% ของส่วนผสมระหว่างอลูมิเนียม, แมงกานีสและซิลิกอน ซึ่งต่อมาได้กลายเป็นแบบมาตรฐานแบบ K เป็นที่นิยมกันอย่างแพร่หลายที่สุด สามารถใช้ในสภาวะงานที่เป็น Oxidizion หรือ Inert ได้ดีกว่าแบบอื่น สามารถทนอุณหภูมิได้ถึง 1260 °C (2300 °F) และที่อุณหภูมิต่ำถึง -250 °C (420 °F) ในสภาพงานที่ต้องการแผ่รังสีโดยตรงจากแหล่งกำเนิดความร้อน แบบ K ก็สามารถใช้งานได้ดีเช่นกัน



รูปที่ 3.37 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของแรงเคลื่อนไฟฟ้ากับอุณหภูมิของเทอร์โมคัปเปิลแบบ K

คุณสมบัติที่เด่นมากของเทอร์โมคัปเปิลแบบ K คือแรงเคลื่อนเออาร์พุดสูงกว่าแบบอื่นๆ  
ข้อควรระวัง ไม่ควรใช้เทอร์โมคัปเปิลแบบ K สัมผัสโดยตรงกับ

1. ในสภาวะงานที่เป็น Reducing หรือเป็นการใช้งานสลับกันระหว่าง Oxidizing และ Reducing

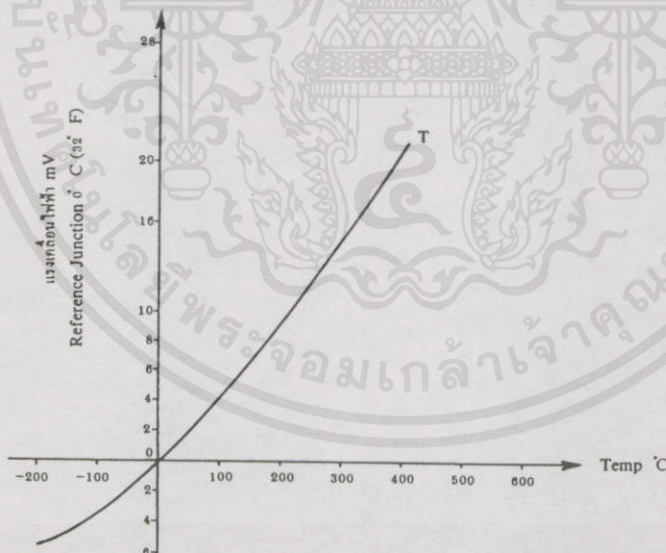
2. สภาวะงานที่มีไอของซัลเฟอร์ เพราะซัลเฟอร์จะทำลายโลหะทั้งคู่ของเทอร์โมคัปเปิล โดยเฉพาะสายลบจะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว

3. สภาวะงานที่เป็น Vacuum ยกเว้นในช่วงระยะเวลาสั้นๆ

ถ้าจำเป็นต้องใช้งานเทอร์โมคัปเปิลกับสภาพดังกล่าวนี้จะต้องใช้ Protecting Tube ป้องกันเสียก่อนอายุการใช้งานของเทอร์โมคัปเปิลแบบ K นี้ประมาณ 20 ปี เพราะหลังจากนั้นส่วนผสมจะเปลี่ยนไปโดยจะมีเหล็กเพิ่มประมาณ 2% และส่วนผสมบางอย่างเช่นแมงกานีส จะลดปริมาณลง

### 3.2.2.10 เทอร์โมคัปเปิลแบบ T (Type T Copper V.S. Constantan)

เป็นเทอร์โมคัปเปิลแบบที่เหมาะสมสำหรับการวัดอุณหภูมิต่ำกว่าจุดเยือกแข็งของน้ำ สายบวกของเทอร์โมคัปเปิลแบบ T ทำมาจากทองแดง และสายลบทำมาจาก Constantan ในสภาพการใช้งาน ปกติสามารถวัดอุณหภูมิต่ำกว่า  $370^{\circ}\text{C}$  อัตราการเกิด Oxide ของโลหะเทอร์โมคัปเปิลจะเพิ่มมากขึ้น เป็นแบบที่ทนการกัดกร่อนในบรรยากาศที่มีความชื้นได้ดีเป็นพิเศษ และสามารถใช้งานในสภาวะที่เป็น Vacuum, Oxidizing, Reducion หรือ Inert ได้ดี

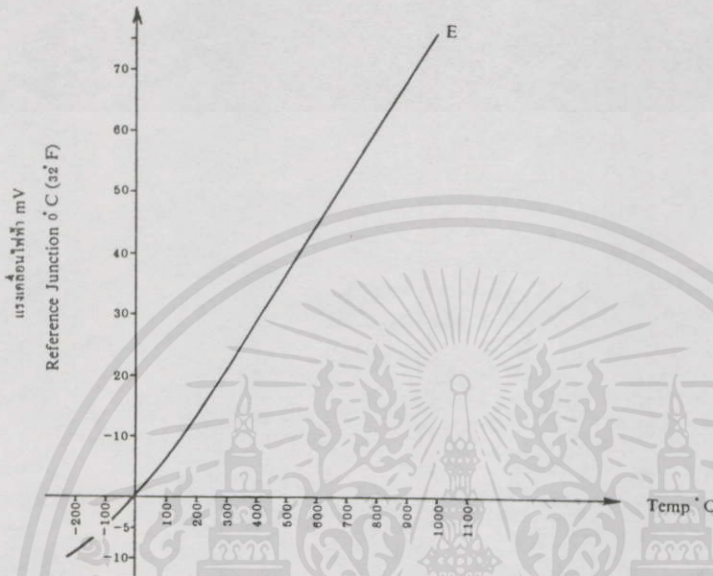


รูปที่ 3.38 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของแรงเคลื่อนไฟฟ้ากับอุณหภูมิของเทอร์โมคัปเปิลแบบ T

การใช้งานที่ต้องสัมผัสกับการแผ่รังสีโดยตรงจะทำให้ส่วนผสมของเทอร์โมคัปเปิลเปลี่ยนไปได้ จึงไม่เหมาะกับงานลักษณะนี้ จากการทดลองใช้งานใน 20 ปี ส่วนผสมของนิกเกิลและสังกะสี จะเพิ่มขึ้นประมาณ 10%

### 3.2.2.11 เทอร์โมคัปเปิลแบบ E (Type E Chommel V.S.Constantan)

สายบวกทำจากส่วนผสมระหว่าง 10% ของโครเมียม+90% ของนิกเกิล และสายลบทำจาก Constantan อุณหภูมิใช้งานปกติอยู่ระหว่าง  $-250^{\circ}\text{C}$  ถึง  $871^{\circ}\text{C}$  เหมาะกับสภาพงานที่เป็น Oxidizing คุณสมบัติด้านอื่น คล้ายกับเทอร์โมคัปเปิลแบบ K



รูปที่ 3.39 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของแรงเคลื่อนไฟฟ้ากับอุณหภูมิของเทอร์โมคัปเปิลแบบ E

### 3.2.2.12 เครื่องมือวัด Testo 400

ในการวัดค่าของท่อเวอร์เทกซ์เราใช้เครื่องมือวัดเป็นแบบเทอร์โมคัปเปิล Testo 400 ซึ่งใช้ปุ่มแสดงค่าฟังก์ชันการทำงานต่างๆ ดังนี้

1. ปุ่มล้างจอภาพ
2. ปุ่มเลือกฟังก์ชันการทำงาน สามารถเลือกการทำงาน ได้ 3 แบบ
3. ปุ่มสั่งเก็บข้อมูลหรือสั่งพิมพ์ข้อมูล
4. ตัวเชื่อมหลัก/ใช้ชาร์ตแบตเตอรี่แบบรวดเร็ว
5. ช่องต่อพ่วงอุปกรณ์เครื่องพิมพ์
6. ค่าที่วัดได้สามารถพิมพ์ได้ ณ ตำแหน่งวัด
7. ช่องต่อเชื่อมกับคอมพิวเตอร์ PC

8. ช่องการเชื่อมต่อ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

9. การใช้งานทำได้โดยการกดปุ่มเลื่อนไปมา

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีให้คำปรึกษาเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

10. ช่องรับสัญญาณเข้าได้ 2 ช่องทาง

### 11. หัววัดลมแบบเสียบเข้า สามารถปรับองศาได้

ช่องของการวัดอยู่ระหว่างช่วง 0 ถึง 100 m/s โดยสามารถที่จะแบ่งได้เป็น 3 ช่วงดังนี้

- ความเร็วต่ำ มีค่าตั้งแต่ 0-5 m/s
- ความเร็วปานกลาง มีค่าตั้งแต่ 5-40 m/s
- ความเร็วสูง มีค่าตั้งแต่ 40-100 m/s

เครื่องวัดอุณหภูมิจะให้ค่าที่ถูกต้องในช่วงความเร็วลมต่ำและเครื่องวัดความเร็วลมจะให้ค่าที่ถูกต้องในช่วงความเร็วปานกลาง

ในขณะที่ผลลัพธ์ที่ดีที่สุด (การวัดค่าที่มี Yield ดีที่สุด) ของท่อนำร่อง เกิดในช่วงความเร็วลมสูง

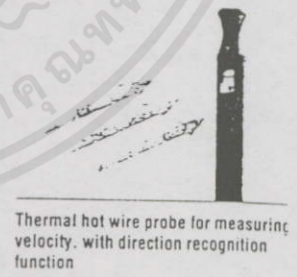
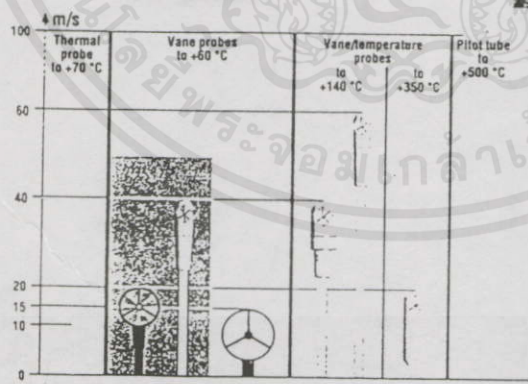
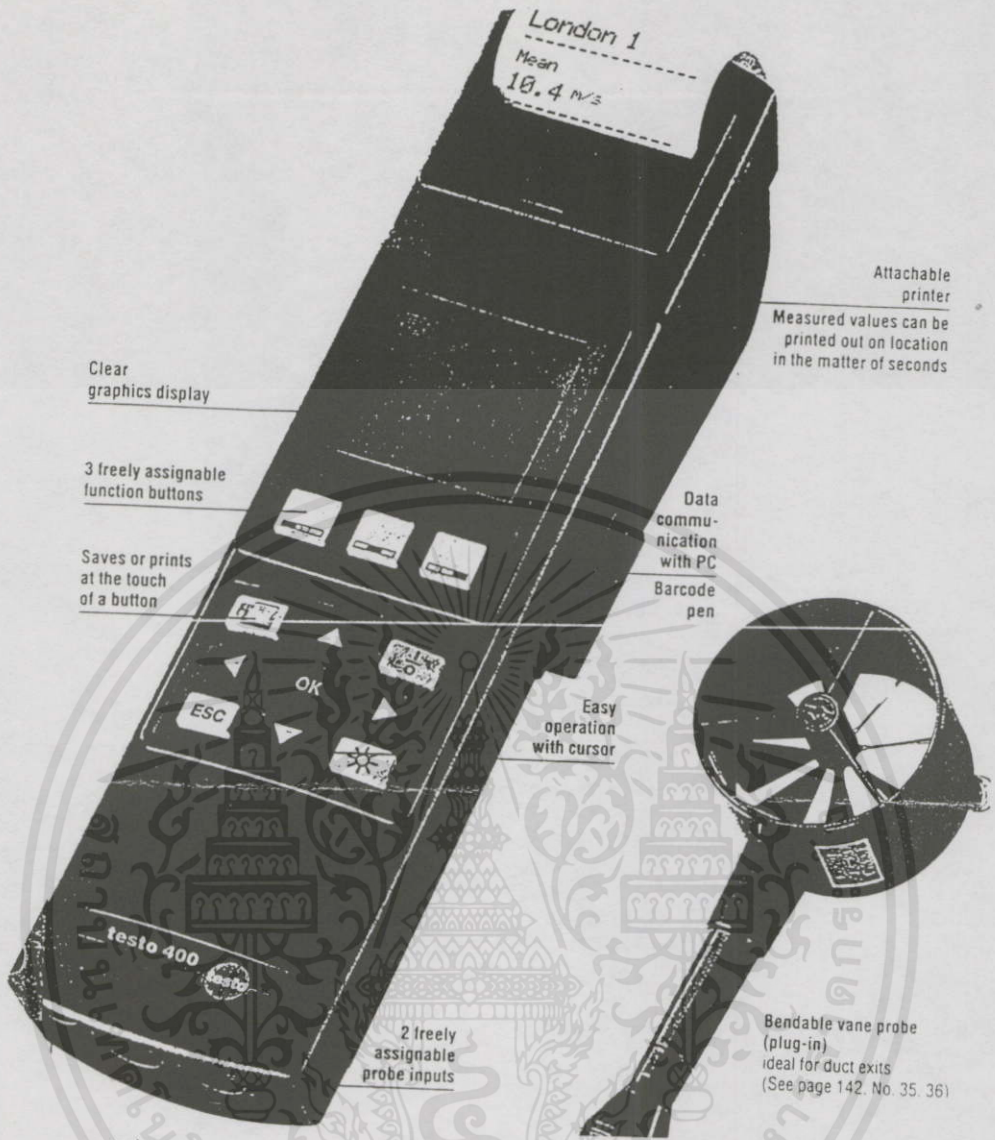
ปัจจัยที่ต้องคำนึงถึงในการวัดค่าที่ถูกต้องอุณหภูมิ ขณะวัดซึ่งตัววัดค่าอุณหภูมิขณะวัดซึ่งตัววัดค่าอุณหภูมิจะใช้กับอุณหภูมิ 70 °C (แต่จะมีตัวพิเศษบางตัวสามารถใช้ได้กับอุณหภูมิสูงสุด 350 °C) ในขณะที่ท่อนำร่องสามารถใช้ในสถานะที่อุณหภูมิสูงกว่า 350 °C ได้

หลักการของตัววัดอุณหภูมิความร้อน จะขึ้นอยู่กับวัสดุและการสูญเสียความร้อนเมื่อปะทะลม เป็นการรักษาอุณหภูมิให้คงที่ทำได้โดยการใช้สวิทช์ควบคุม ซึ่งทำหน้าที่ปรับกระแสไฟให้เหมาะสมกับความเร็วลมในขณะนั้น

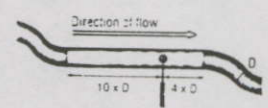
เมื่อใช้วัดตัววัดความเร็วและอุณหภูมิในสถานะที่กระแสลมแปรปรวน จะได้ค่าการที่สูงกว่าเมื่อเทียบขณะที่กระแสลมเคลื่อนที่ได้ในทิศทางเดียว อันเนื่องมาจากหัวอ่านมาจากหัวอ่านจะได้รับความร้อนในทุกทิศทาง

ผลอันนี้สามารถสังเกตได้จากตำแหน่งที่ต่างกันของท่อที่ใช้วัด และเกิดขึ้นแม้ขณะที่ความเร็วลมมีค่าต่ำก็ตาม ดังนั้นจึงควรวัดค่าในส่วนที่ท่อมีลักษณะเป็นเส้นตรงส่วนที่ใช้วัดที่เหมาะสมคือท่อที่มีลักษณะตรง ก่อนถึงหัวอ่านอย่างน้อย 10 เท่าของเส้นผ่าศูนย์กลาง และตรงไปอีกหลังหัวอ่านอย่างน้อย 4 เท่าของเส้นผ่าศูนย์กลาง และท่อไม่มีลักษณะ เบี้ยว, โป่ง, โค้งงอ เป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

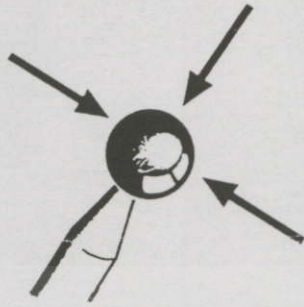


Thermal hot wire probe for measuring velocity, with direction recognition function



Measuring and application ranges of the velocity probes

เอกสารนี้ที่รูปที่ 3.40 ลักษณะของเครื่องมือวัด Testo 400 ศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



Thermal hot ball probe for measuring velocity independent of direction

รูปที่ 3.41 ลักษณะของหัววัด Testo 400



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 4

### การทดลองและผลการทดลอง

#### 4.1 อุปกรณ์การทดลอง

##### 4.1.1 ชุดอุปกรณ์ทำความเย็นแบบหมุนวน

- ชุดอุปกรณ์ทำความเย็นแบบหมุนวน (Vortex Chamber)  
ขนาด 75 x 25 mm ที่มีหัวฉีด 2 หัว ดังแสดงในรูปที่ 3.4 1 ชุด
- ท่อวอร์เทกซ์ (Vortex Tube) ยาว 90 mm ปลายด้านหนึ่งมีเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 38 mm อีกด้านหนึ่งปรับองศาความเอียงมุมได้ 1, 2 และ 3 องศา ดังแสดงในรูปที่ 3.5 อย่างละ 1 ชิ้น
- ตัวแพร่อากาศ (Diffuser Plate) ขนาด 250 x 9 mm ดังแสดงในรูปที่ 3.8 1 ชิ้น
- ตัวปิดกระจายอากาศ (End Plate) ขนาด 250 x 3 mm ดังแสดงในรูปที่ 3.9 1 ชิ้น

##### 4.1.2 อุปกรณ์แหล่งจ่ายอากาศ

- เครื่องอัดอากาศ (Compressor) และตัวกรองอากาศ ดังแสดงในรูปที่ 3.29 1 ชุด
- Pressure Gauge มีช่วงวัดระหว่าง 0-5 bar ดังแสดงในรูปที่ 3.10 1 ตัว
- Pressure Regulator ดังแสดงในรูปที่ 3.10 1 ชุด

##### 4.1.3 อุปกรณ์อื่น ๆ (Accessory)

- Work Table ขนาด 400 x 700 x 1600 mm ดังแสดงในรูปที่ 3.10 1 ตัว
- Stand สำหรับยึดท่อวอร์เทกซ์ ขนาด 150 x 150 x 120 mm  
ดังแสดงในรูปที่ 3.6 1 ตัว
- ชุดวัดอุณหภูมิ ของ Measure Testo ดังแสดงในรูปที่ 3.40 1 ชุด

#### 4.2 วิธีการทดลอง

1. ปรับอุปกรณ์ทำความเย็นแบบหมุนวน ให้ท่อมีองศาความเอียงมุม 2 องศา ช่องกระจายอากาศ (Gap) เป็น 0.5 mm

2. วัดอุณหภูมิอากาศด้านทางเข้า ปรับแรงดันให้ได้ 2 bar

3. วัดอุณหภูมิตามแนว K1 ที่ตำแหน่ง T1-T10 ทั้ง 10 จุด , ตามแนว K2 ที่ตำแหน่ง T2-T1 ทั้ง 9 จุด และตามแนว K3 ที่ตำแหน่ง T1-T10 ทั้ง 9 จุด บันทึกผลการทดลอง

4. ทำการทดลองตามข้อ 1-3 แต่ปรับความดันอากาศทางเข้าอุปกรณ์ทำความเย็นเป็น 2.5 , 3.0 , 3.5 , 4.0 และ 4.5 bar ตามลำดับ

5. ทำการทดลองในกรณีที่ปรับอุปกรณ์หล่อเย็น ให้มีองศาความเย็งมมเป็น 4 องศา ทดสอบที่ช่องกระจายอากาศ (Gap) = 0.5, 1, 1.5, 2, 2.5 และ 3 mm แต่ละกรณีทดลองที่ความดัน = 2 , 2.5 , 3.0 , 3.5 , 4.0 และ 4.5 bar ตามลำดับ

6. ทำการทดลองในกรณีที่ปรับอุปกรณ์หล่อเย็น ให้มีองศาความเย็งมมเป็น 6 องศา ทดสอบที่ช่องกระจายอากาศ (Gap) = 0.5, 1, 1.5, 2, 2.5 และ 3 mm แต่ละกรณีทดลองที่ความดัน = 2 , 2.5 , 3.0 , 3.5 , 4.0 และ 4.5 bar ตามลำดับ

7. วิเคราะห์ผลการทดลอง โดยพิจารณาในด้าน

- อิทธิพลของความเย็งมมปลายท่อที่มีต่อการลดลงของอุณหภูมิภายในท่อออร์เทกซ์
- อิทธิพลของความดันที่มีต่อการลดลงของอุณหภูมิภายในท่อออร์เทกซ์
- อิทธิพลของการปรับช่องกระจายอากาศที่มีต่อการลดลงของอุณหภูมิภายในท่อออร์เทกซ์
- อิทธิพลของการปรับช่องกระจายอากาศภายในท่อตามแนวแกนกลาง และตามแนวรัศมีที่มีต่อการลดลงของอุณหภูมิภายในท่อออร์เทกซ์
- อิทธิพลของการปรับช่องกระจายอากาศภายในท่อตามแนวแกนกลาง ที่มีต่อการลดลงของอุณหภูมิภายในท่อออร์เทกซ์
- อิทธิพลของการปรับตำแหน่งของการกระจายอุณหภูมิภายในท่อตามแนวแกนกลาง และตามแนวรัศมีที่มีต่อการลดลงของอุณหภูมิภายในท่อออร์เทกซ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 4.3 ผลการทดลอง

#### 4.3.1 อิทธิพลช่องกระจายอากาศ (Gap) ที่มีผลต่อการลดลงของอุณหภูมิ

รูปที่ 4.1 เป็นการเปรียบเทียบระหว่างช่องกระจายอากาศที่ขนาดต่างๆ โดยช่องกระจายอากาศ (Gap) = 1 mm, 2 mm และ 3 mm ตามลำดับ ที่ความเอียงมุมท่อ 6 องศา ความดันทางเข้า 2.0 bar จะพบว่าช่องกระจายอากาศ (Gap) = 3 mm อุณหภูมิตกลงมีค่ามากที่สุดระยะ  $x/d = 0.42$

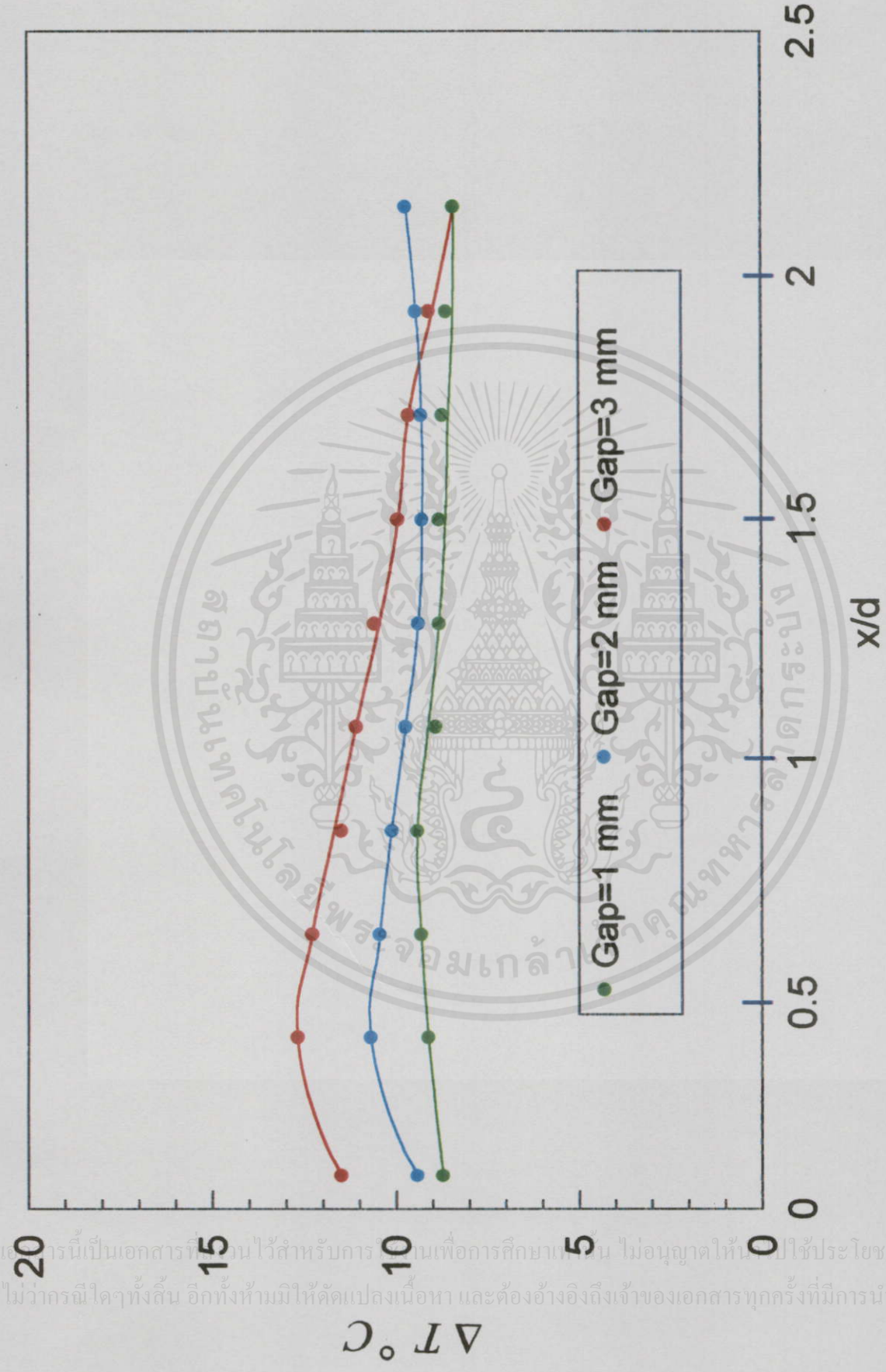
รูปที่ 4.2 เป็นการเปรียบเทียบระหว่างช่องกระจายอากาศขนาดต่างๆ โดยช่องกระจายอากาศ (Gap) = 1 mm, 2 mm และ 3 mm ตามลำดับ ที่ความเอียงมุมท่อ 6 องศา ความดันทางเข้า 3.0 bar จะพบว่าช่องกระจายอากาศ (Gap) = 3 mm อุณหภูมิตกลงมีค่ามากที่สุดระยะ  $x/d = 0.42$

รูปที่ 4.3 เป็นการเปรียบเทียบระหว่างช่องกระจายอากาศขนาดต่างๆ โดยช่องกระจายอากาศ (Gap) = 1 mm, 2 mm และ 3 mm ตามลำดับ ที่ความเอียงมุมท่อ 6 องศา ความดันทางเข้า 4.5 bar จะพบว่าช่องกระจายอากาศ (Gap) = 3 mm อุณหภูมิตกลงมีค่ามากที่สุดระยะ  $x/d = 0.42$

จากการทดลองรูปที่ 4.1 , รูปที่ 4.2 และรูปที่ 4.3 เราสามารถสังเกตได้ว่าอุณหภูมิกายในท่อออร์เทกซ์จะลดลง เมื่อมีอิทธิพลทางด้าน ความดันทางเข้า, ความเอียงมุมท่อ และช่องกระจายอากาศ โดยเราสามารถสรุปโดยรวมได้ดังนี้

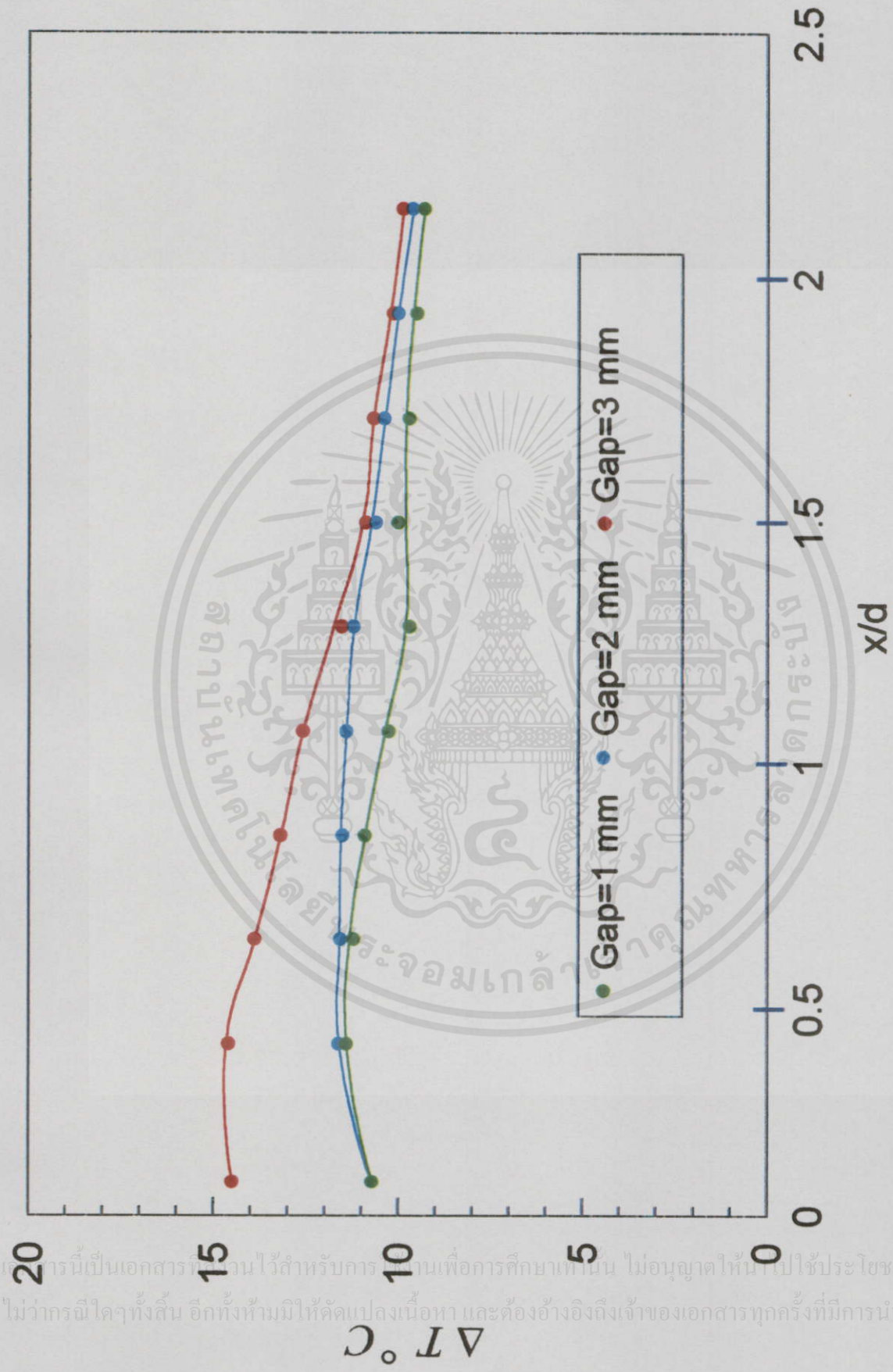
1. ความดันอากาศที่ทางเข้ามีค่ามาก ๆ จะทำให้มีประสิทธิภาพการทำความเย็นมากขึ้น ทั้งในกรณีช่องกระจายอากาศ (Gap) = 1.0 mm , 2.0 mm และ 3.0 mm ฉะนั้นประสิทธิภาพการทำความเย็นมากที่สุด เมื่อความดันอากาศที่เข้าท่อก็คือเป็น = 4.5 bar เมื่อช่องกระจายอากาศ (Gap) = 3.0 mm และความเอียงมุมท่อ = 6 องศา เมื่อความดันอากาศเข้าน้อยลง จะทำให้ประสิทธิภาพการทำความเย็นได้น้อยลงด้วย

2. ประสิทธิภาพการทำความเย็นมีค่ามากที่สุดเมื่อค่า  $x/d = 0.42$  ทั้งในกรณีที่ช่องกระจายอากาศ (Gap) = 1.0 mm, 2.0 mm และ 3.0 mm ตามลำดับ กล่าวคือเมื่อความดันอากาศ = 4.5 bar การทำความเย็นได้สูงสุด ( $\Delta T$ ) = 12.8 °C , 14.6 °C และ 19.7 °C หรือประสิทธิภาพการทำความเย็นในท่อตามแนวแกนมีค่าสูง = 68%



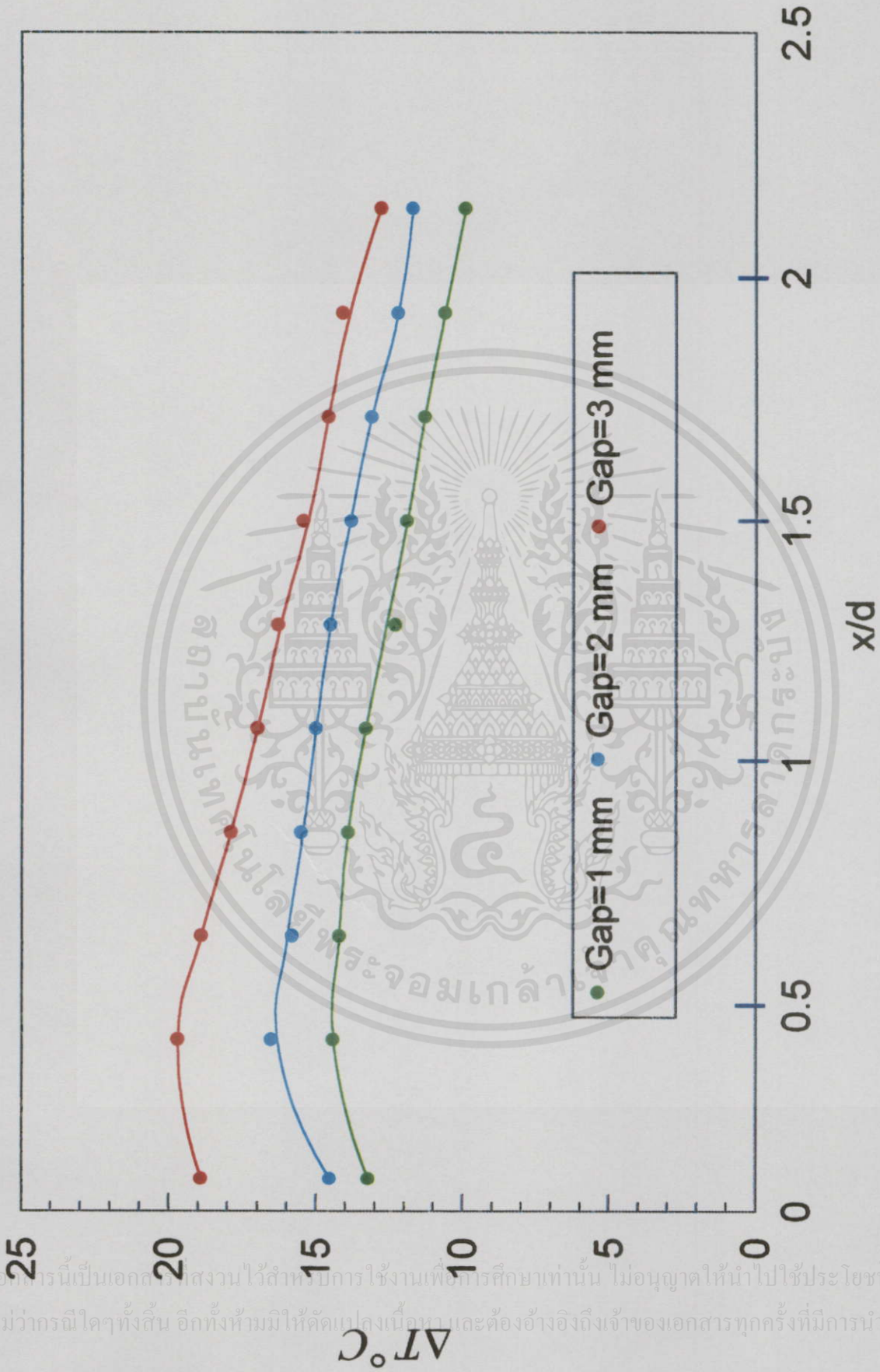
รูปที่ 4.1 อิทธิพลของระยะอากาศ (Gap) ขนาดต่างๆ มีผลต่อการลดลงของอุณหภูมิ ที่ความดัน = 2.0 bar มีความเร็วเชิงมุม  $\theta = 6$  องศา

นี่เป็นเอกสารที่... ไม่อนุญาติให้... ใช้ประโยชน์... ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.2 อิทธิพลช่องกระจายอากาศ (Gap) ขนาดต่างๆ มีผลต่อการลดลงของอุณหภูมิ ที่ความดัน = 3.0 bar มีความเร็วเชิงมุมท่อ = 6 องศา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่... ไม่อนุญาตให้... ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า... ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น... ขอสงวนสิทธิ์ในสิ่งที่ปรากฏ... และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.3 อิทธิพลของระยะอากาศ (Gap) ขนาดต่างๆ มีผลต่อการลดลงของอุณหภูมิ ที่ความดัน = 3.0 bar มีความเร็วเชิงมุม = 6 องศา

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหานี้และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 4.3.2 อิทธิพลของความดันทางเข้ามีผลต่อการลดลงของอุณหภูมิ

รูปที่ 4.4 เป็นการเปรียบเทียบระหว่างความดันต่างๆ โดยมีความดันทางเข้า 2.0 bar, 2.5 bar, 3.0 bar, 3.5 bar, 4.0 bar และ 4.5 bar ตามลำดับ ช่องกระจายอากาศ (Gap) = 0.5 mm ที่ความเยี่ยงมุมท่อ 2 องศา จะพบว่าความดันทางเข้าที่เหมาะสม = 4.5 bar อุณหภูมิลดลงมีค่ามากที่สุดระยะ  $x/d = 0.42$

รูปที่ 4.5 เป็นการเปรียบเทียบระหว่างความดันต่างๆ โดยมีความดันทางเข้า = 2.0 bar, 2.5 bar, 3.0 bar, 3.5 bar, 4.0 bar และ 4.5 bar ตามลำดับ ช่องกระจายอากาศ (Gap) = 1.5 mm ที่ความเยี่ยงมุมท่อ 4 องศา จะพบว่าความดันทางเข้าที่เหมาะสม = 4.5 bar อุณหภูมิลดลงมีค่ามากที่สุดระยะ  $x/d = 0.42$

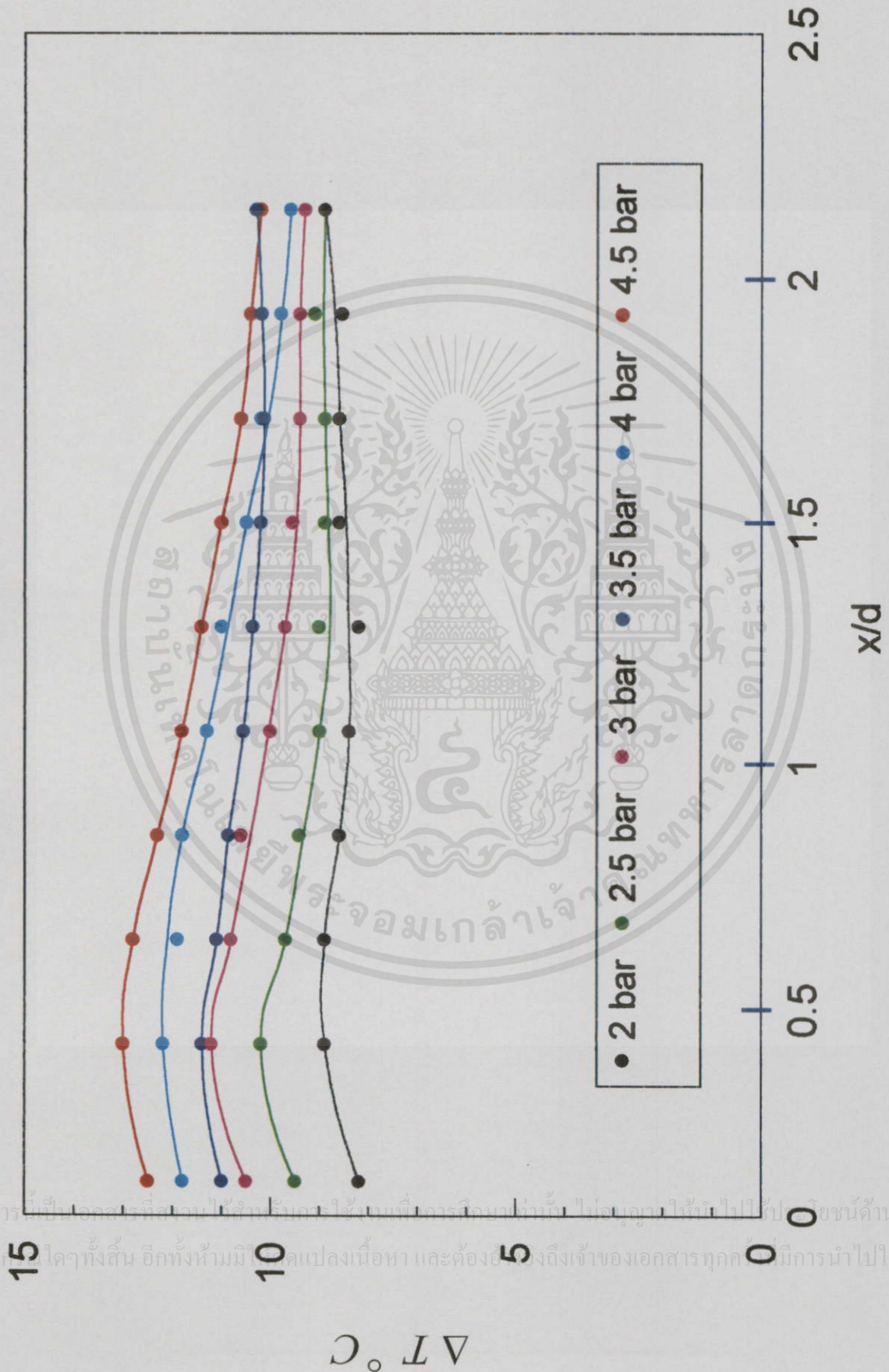
รูปที่ 4.6 เป็นการเปรียบเทียบระหว่างความดันต่างๆ โดยมีความดันทางเข้า = 2.0 bar, 2.5 bar, 3.0 bar, 3.5 bar, 4.0 bar และ 4.5 bar ตามลำดับ ช่องกระจายของอากาศ (Gap) = 3 mm ที่ความเยี่ยงมุมท่อ 6 องศา จะพบว่าความดันทางเข้าที่เหมาะสม = 4.5 bar จะทำให้อุณหภูมิลดลงมีค่ามากที่สุดระยะ  $x/d = 0.42$

จากการทดลองรูปที่ 4.4 , รูปที่ 4.5 และรูปที่ 4.6 เราสามารถสังเกตได้ว่าอุณหภูมิภายในท่อวอร์เท็กซ์จะลดลง เมื่อมีอิทธิพลทางด้าน ความดันลม, ความเยี่ยงมุมท่อ และช่องกระจายอากาศ โดยเราสามารถสรุปโดยรวมได้ดังนี้

1. ความดันทางเข้าต่างๆ ที่มีช่องกระจายอากาศ (Gap) = 0.5 mm , 1.5 mm และ 3.0 mm มีความเยี่ยงมุมท่อ = 2 องศา, 4 องศา และ 6 องศา ตามลำดับ ฉะนั้นประสิทธิภาพการทำความเย็นมากที่สุด เมื่อช่องกระจายอากาศ (Gap) = 3.0 mm ความเยี่ยงมุมท่อ = 6 องศา และความดันทางเข้า = 4.5 bar เมื่อช่องกระจายอากาศ (Gap) ไม่เหมาะสม จะทำให้ประสิทธิภาพการทำความเย็นได้น้อยลงด้วย

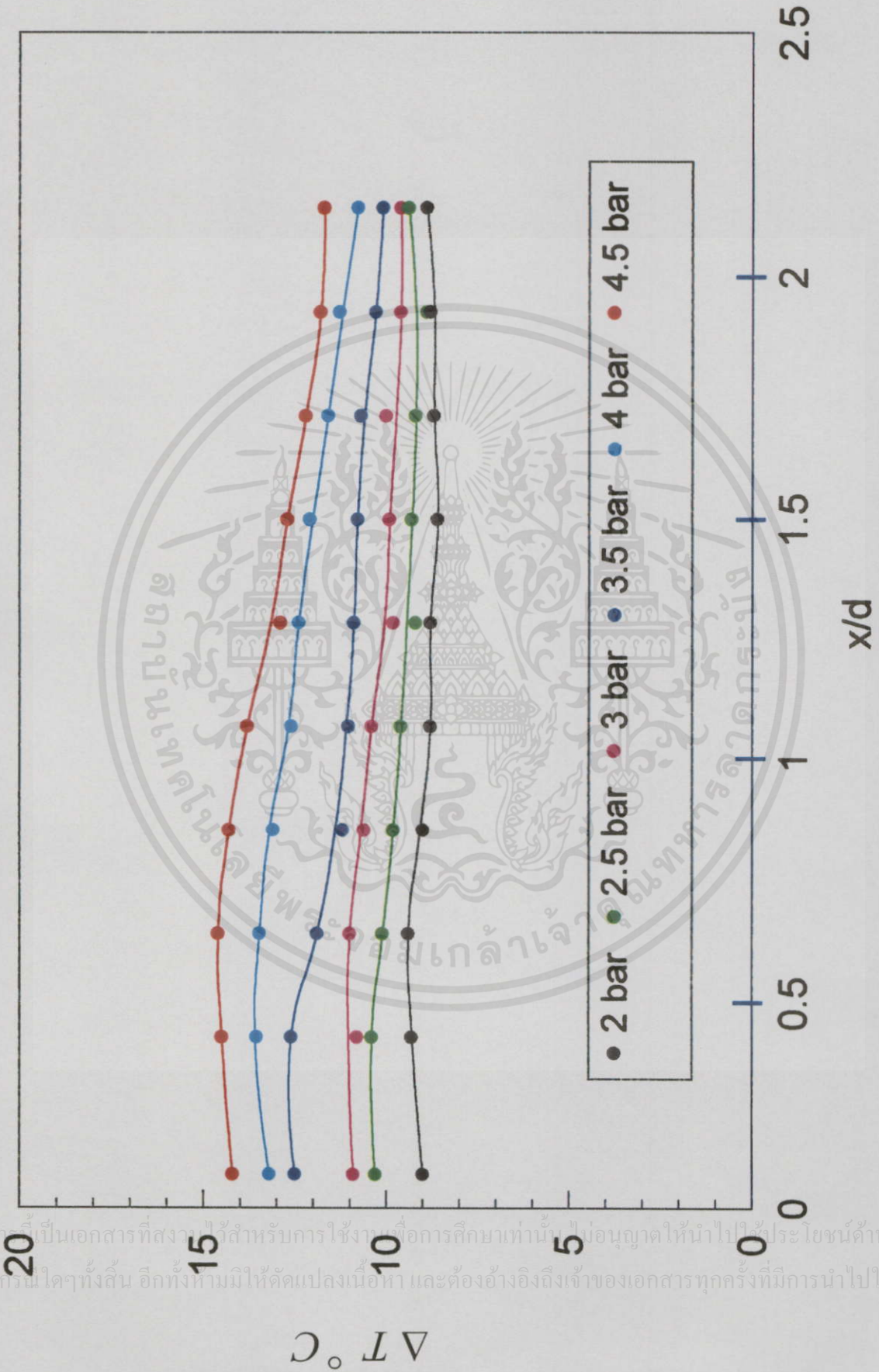
2. ประสิทธิภาพการทำความเย็นมีค่ามากที่สุดเมื่อค่า  $x/d = 0.42$  ทั้งในกรณีที่มีความดันทางเข้า = 2.0 bar, 2.5 bar, 3.0 bar, 3.5 bar, 4.0 bar และ 4.5 bar ตามลำดับ กล่าวคือเมื่อช่องกระจายอากาศ (Gap) = 3 mm การทำความเย็นได้สูงสุด ( $\Delta T$ ) = 13.1 °C , 14.6 °C และ 19.7 °C หรือประสิทธิภาพการทำความเย็นในท่อตามแนวแกนมีค่าเท่ากับ 68%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



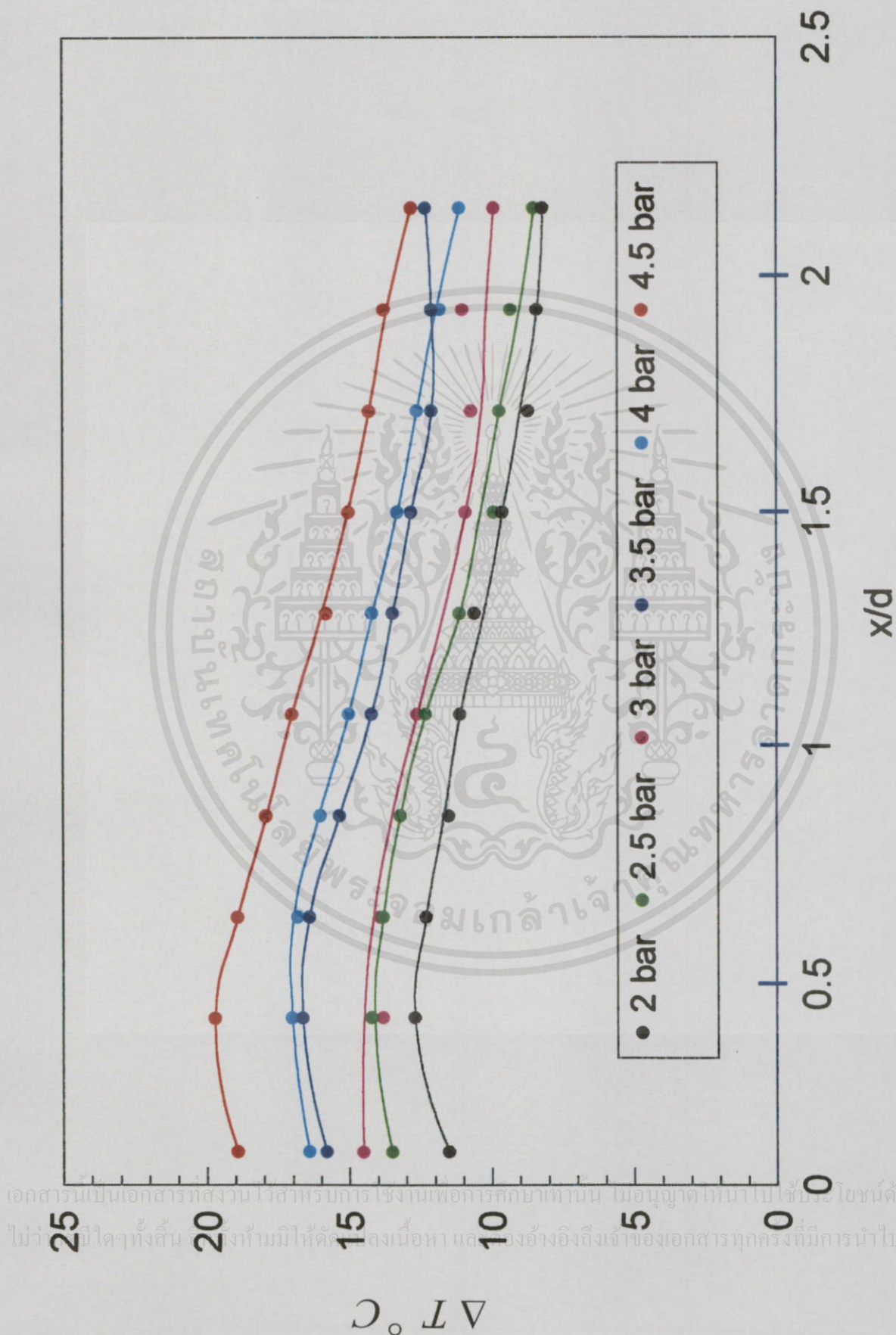
รูปที่ 4.4 อิทธิพลความดันต่างๆ มีผลต่อการลดลงของอุณหภูมิ ที่ช่องระบายอากาศ (Gap) = 0.5 mm มีความเร็วลมเท่ากับ 6 องศา

เอกสารนี้เป็นลิขสิทธิ์ของสถาบันวิจัยและพัฒนาเทคโนโลยีพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าพระยา กรุงเทพมหานคร



รูปที่ 4.5 อิทธิพลความดันต่างๆ มีผลต่อการลดลงของอุณหภูมิ ที่ช่องกระจายอากาศ (Gap) = 1.5 mm มีความเร็วลมเท่ากับ 6 องศา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่าในรูปแบบใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.6 อิทธิพลความดันต่างๆ มีผลต่อการลดลงของอุณหภูมิ ที่ช่องกระจายอากาศ (Gap) = 3.0 mm มีความเร็วลมเท่ากับ 6 องศา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้เพื่อประโยชน์ด้านอื่น  
ไม่ว่าในใดๆทั้งสิ้น ห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหาและอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 4.3.3 อิทธิพลของความเอียงมุมท่อ มีผลต่อการลดลงของอุณหภูมิ

รูปที่ 4.7 เป็นการเปรียบเทียบระหว่างความเอียงมุมท่อขนาดต่างๆ โดยมีความเอียงมุมท่อ = 2 องศา, 4 องศา และ 6 องศา ช่องกระจายอากาศ (Gap) = 0.5 mm องศา ความดันทางเข้า 4.5 bar จะพบว่าความเอียงมุมท่อ 6 องศา อุณหภูมิลดลงมีค่ามากที่สุดระยะ  $x/d = 0.42$

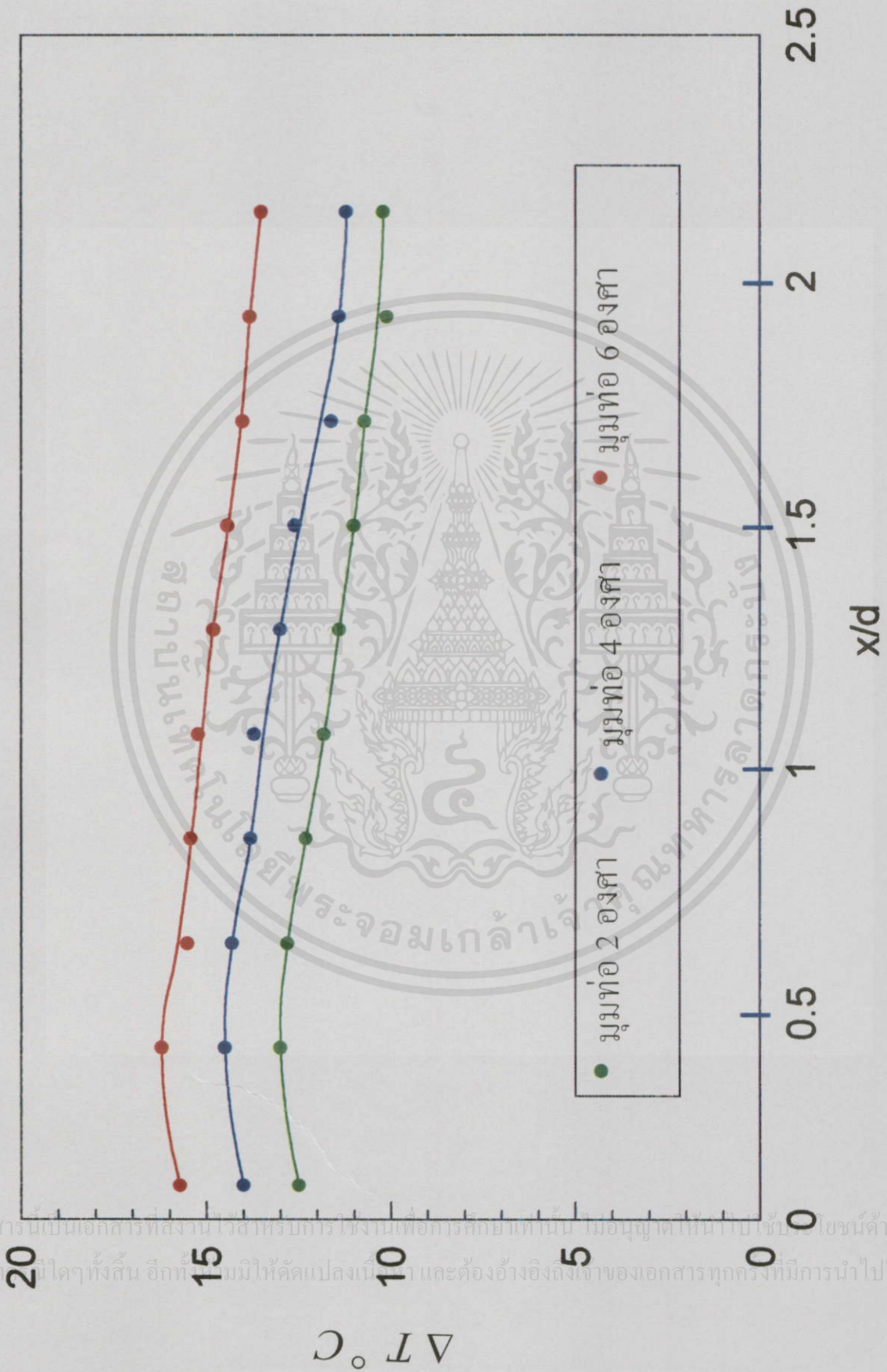
รูปที่ 4.8 เป็นการเปรียบเทียบระหว่างความเอียงมุมท่อขนาดต่างๆ โดยมีความเอียงมุมท่อ = 2 องศา, 4 องศา และ 6 องศา ช่องกระจายอากาศ (Gap) = 1.5 mm ความดันทางเข้า = 4.5 bar จะพบว่าที่ความเอียงมุมท่อ 6 องศา อุณหภูมิลดลงมีค่ามากที่สุดระยะ  $x/d = 0.42$

รูปที่ 4.9 เป็นการเปรียบเทียบระหว่างความเอียงมุมท่อขนาดต่างๆ โดยมีความเอียงมุมท่อ = 2 องศา, 4 องศา และ 6 องศา ช่องกระจายของอากาศ (Gap) = 3 mm ความดันทางเข้าที่เหมาะสม = 4.5 bar จะพบว่าที่ความเอียงมุมท่อ 6 องศา จะทำให้อุณหภูมิลดลงมีค่ามากที่สุดระยะ  $x/d = 0.42$

จากการทดลองรูปที่ 4.7, รูปที่ 4.8 และรูปที่ 4.9 เราสามารถสังเกตได้ว่าอุณหภูมิกายในท่อออร์เทกซ์จะลดลง เมื่อมีอิทธิพลทางด้าน ความดันลม, ความเอียงมุมท่อ และช่องกระจายอากาศ โดยเราสามารถสรุปโดยรวมได้ดังนี้

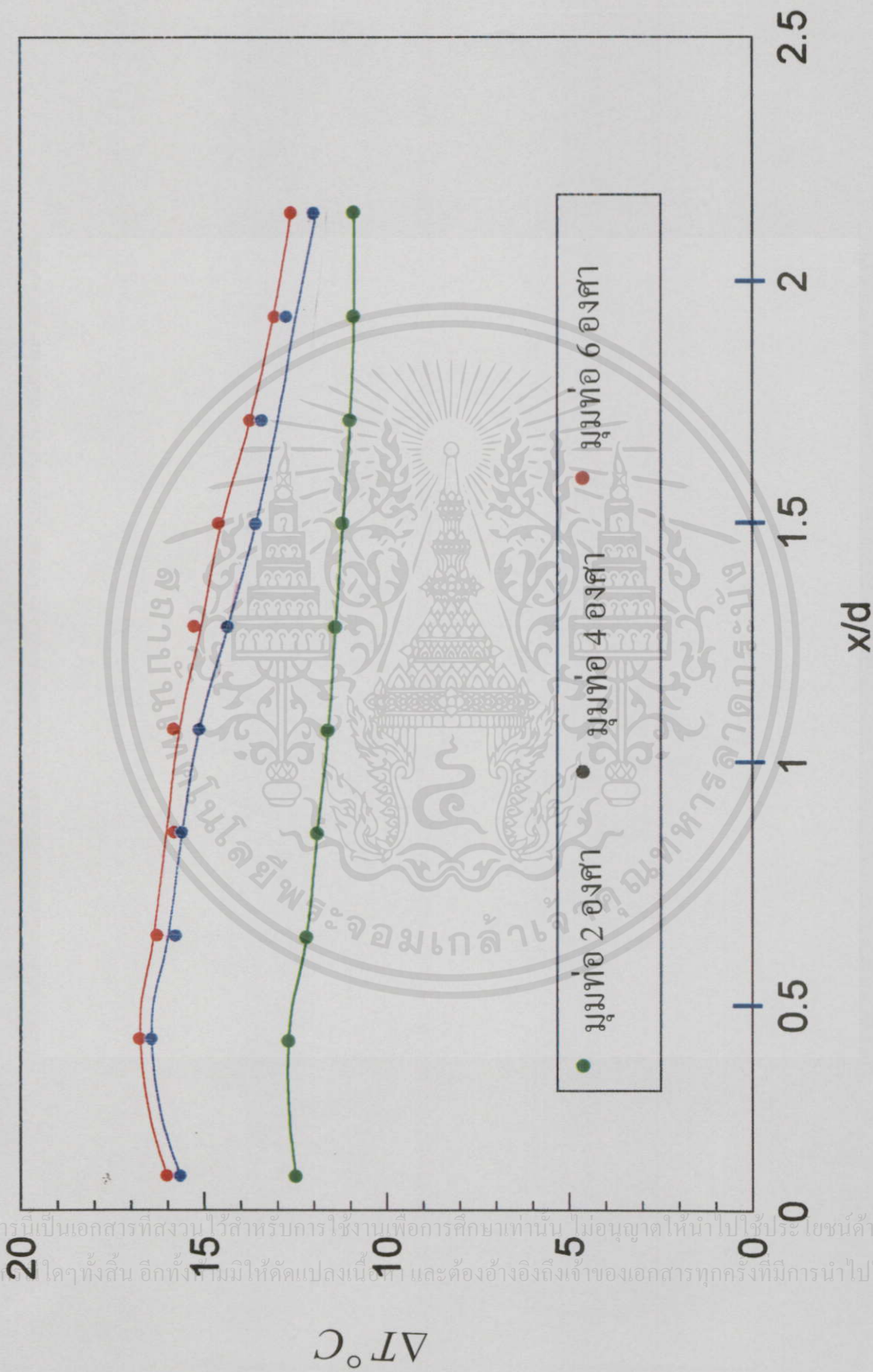
1. ความเอียงมุมท่อขนาดต่างๆ ที่มีความเอียงมุมท่อ = 2 องศา, 4 องศา และ 6 องศา ตามลำดับ ฉะนั้นประสิทธิภาพการทำความเย็นมากที่สุด เมื่อช่องกระจายอากาศ (Gap) = 3.0 mm ความเอียงมุมท่อ = 6 องศา และความดันทางเข้า = 4.5 bar เมื่อมีความเอียงมุมท่อ ขนาดไม่เหมาะสม จะทำให้ประสิทธิภาพการทำความเย็นได้น้อยลงด้วย

2. ประสิทธิภาพการทำความเย็นมีค่ามากที่สุดเมื่อค่า  $x/d = 0.42$  มีความเอียงมุมท่อ = 2 องศา, 4 องศา และ 6 องศา ตามลำดับ ทั้งในกรณีที่กำลังคือเมื่อ ความดันทางเข้า = 4.5 bar การทำความเย็นได้สูงสุด ( $\Delta T$ ) = 16.1 °C , 16.12 °C และ 19.7 °C หรือประสิทธิภาพการทำความเย็นในท่อตามแนวแกนมีค่าเท่ากับ 68%



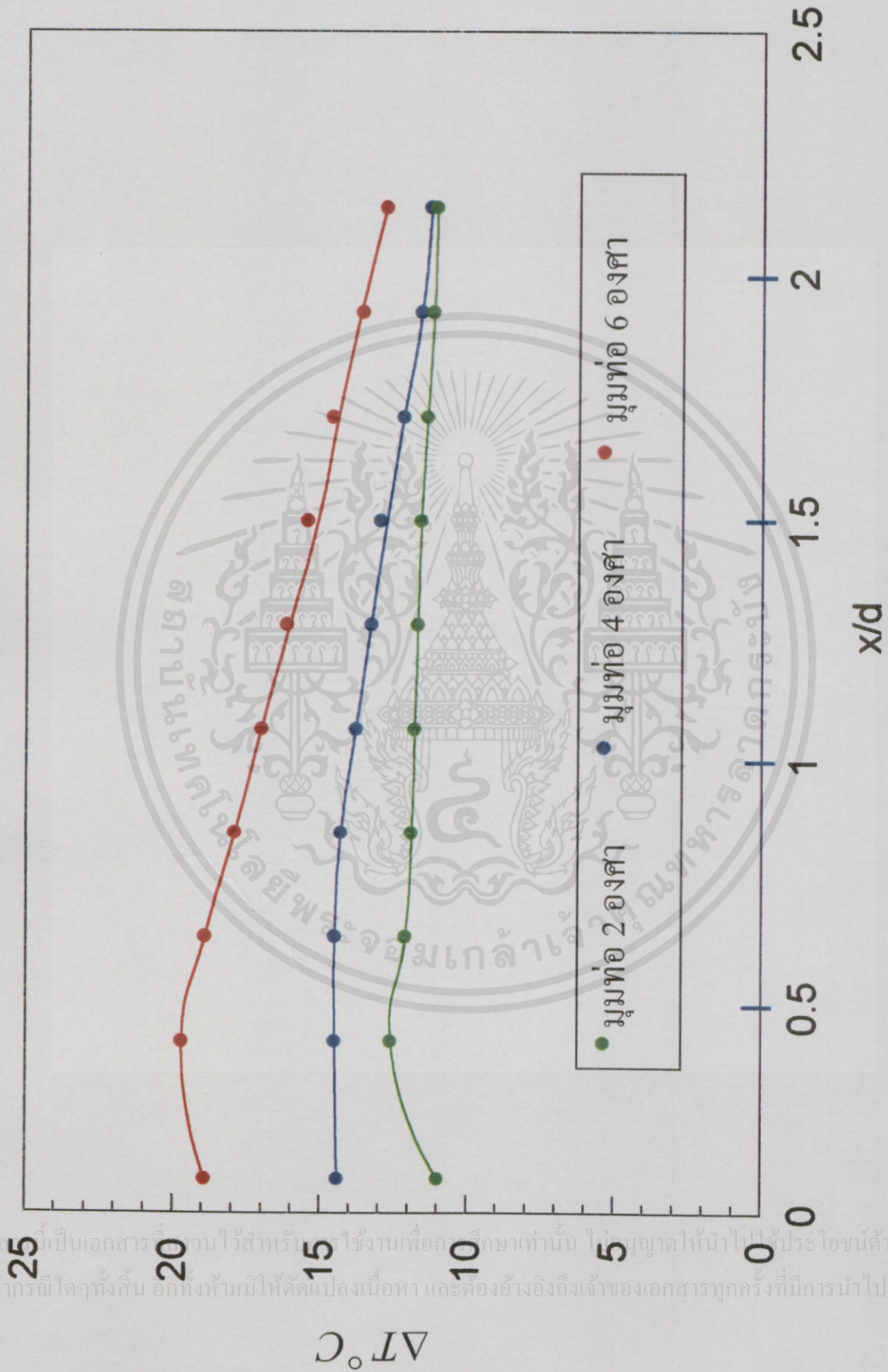
รูปที่ 4.7 อิทธิพลการปรับความเยี่ยงมุมท่อที่มีผลต่อการลดลงของอุณหภูมิ ที่ช่องกระจายอากาศ (Gap)=0.5 bar มีความดัน = 4.5 bar

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษเท่านั้น ไม่อนุญาติให้เผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต  
ไม่ว่าในทางใดก็ตาม อีกทั้งยังมีให้ดัดแปลงเป็นของตนเอง และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.8 อิทธิพลการปรับความเยื้องมุมท่อที่มีผลต่อการลดลงของอุณหภูมิ ที่ช่องกระจายอากาศ (Gap)= 2.0 bar มีความดัน = 4.5 bar

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านอื่น  
ไม่ว่าจะใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.9 อิทธิพลการปรับความเรียงมุมท่อที่มีผลต่อการลดลงของอุณหภูมิ ที่ช่องกระจายอากาศ (Gap)= 3.0 bar มีความดัน = 4.5 bar

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่วางไว้สำหรับ... ใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น... ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.3.4 อิทธิพลของตำแหน่งการวัด ณ. T2, T6 และ T10 กับช่องกระจายอากาศที่มีต่อการลด ลงของอุณหภูมิ

รูปที่ 4.10 แนว K-1 วัดที่จุดกึ่งกลางท่อ, แนว K-3 วัดที่ผนังท่อ และแนว K-2 วัดที่แนว  
กึ่งกลางระหว่างแนว K-1 และ K3 ณ. ตำแหน่งการวัด T10 จะเห็นว่าอุณหภูมิที่แนวกึ่งกลาง  
ท่อ (K-1) จะมีค่าต่ำกว่าที่แนวอื่น ๆ อุณหภูมิที่แนวผนังท่อจะมีค่าสูงสุด แต่จะไม่มากกว่าอุณหภูมิ  
อากาศที่ทางเข้า ( $29^{\circ}\text{C}$ ) ตำแหน่งที่อุณหภูมิจะต่ำที่สุดจะอยู่ที่แนวกึ่งกลางท่อหรือ K-1

รูปที่ 4.11 แนว K-1 วัดที่จุดกึ่งกลางท่อ, แนว K-3 วัดที่ผนังท่อ และแนว K-2 วัดที่แนว  
กึ่งกลางระหว่างแนว K-1 และ K-3 ณ. ตำแหน่งการวัด T6 จะเห็นว่าอุณหภูมิที่แนวกึ่งกลางท่อ  
(K-1) จะมีค่าต่ำกว่าที่แนวอื่น ๆ อุณหภูมิที่แนวผนังท่อจะมีค่าสูงสุด แต่จะไม่มากกว่าอุณหภูมิ  
อากาศที่ทางเข้า ( $29^{\circ}\text{C}$ ) ตำแหน่งที่อุณหภูมิจะต่ำที่สุดจะอยู่ที่แนวกึ่งกลางท่อ

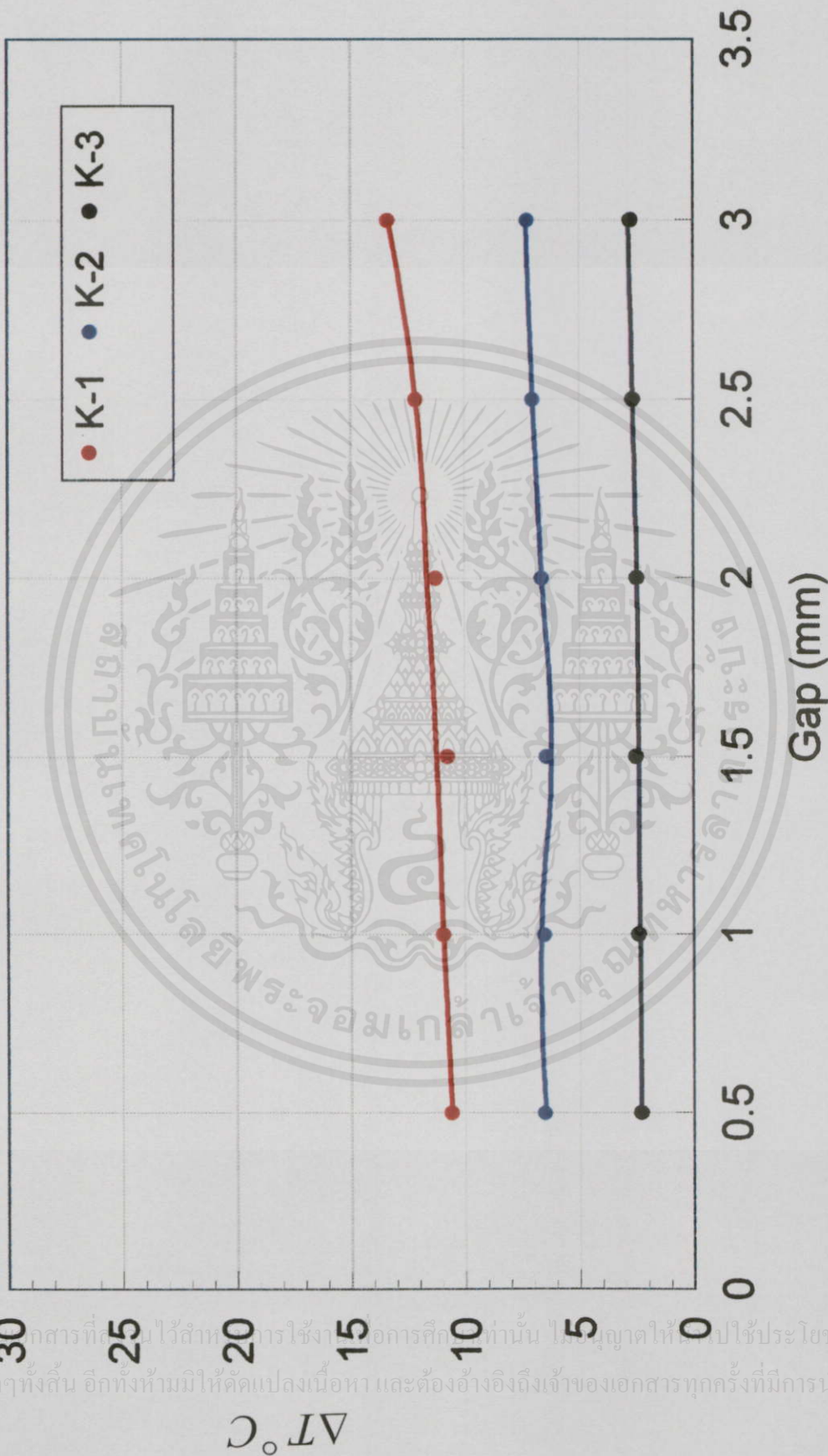
รูปที่ 4.12 แนว K-1 วัดที่จุดกึ่งกลางท่อ, แนว K-3 วัดที่ผนังท่อ และแนว K-2 วัดที่แนว  
กึ่งกลางระหว่างแนว K-1 และ K-3 ตำแหน่งการวัด T2 จะเห็นว่าอุณหภูมิที่แนวกึ่งกลางท่อ (K-1)  
จะมีค่าต่ำกว่าที่แนวอื่น ๆ อุณหภูมิที่แนวผนังท่อจะมีค่าสูงสุด แต่จะไม่มากกว่าอุณหภูมิอากาศที่  
ทางเข้า ( $29^{\circ}\text{C}$ ) ตำแหน่งที่อุณหภูมิจะต่ำที่สุดจะอยู่ที่แนวกึ่งกลางท่อที่ T2 หรือ  $x/d = 0.42$  ซึ่งจะ  
มีประสิทธิภาพการทำความเย็น =  $19.7^{\circ}$

จากการทดลองรูปที่ 4.3.10, รูปที่ 4.3.11 และรูปที่ 4.3.12 เราสามารถสังเกตได้ว่าอุณหภูมิ  
ภายในท่อออร์เทกซ์จะลดลง เมื่อมีอิทธิพลทางด้าน ความดันลม, ความเอียงมุมท่อ, ตำแหน่งการวัด  
และช่องกระจายอากาศ โดยเราสามารถสรุปโดยรวมได้ดังนี้

1. ค่า K-1, K-2 และ K-3 จะมีประสิทธิภาพการทำความเย็นมากที่สุดจากน้อยไปหามาก  
ตามลำดับ โดยที่ตำแหน่งที่อุณหภูมิจะต่ำที่สุดจะอยู่ที่แนวกึ่งกลางท่อหรือค่า K-1 เมื่อช่องกระจาย  
อากาศ (Gap) = 3.0 mm ความเอียงมุมท่อ = 6 องศา และความดันทางเข้า = 4.5 bar เมื่อมีตำแหน่ง  
การวัด T2 ณ. การวัดค่า K1 จะทำให้ประสิทธิภาพการทำความเย็นได้มากขึ้นด้วย

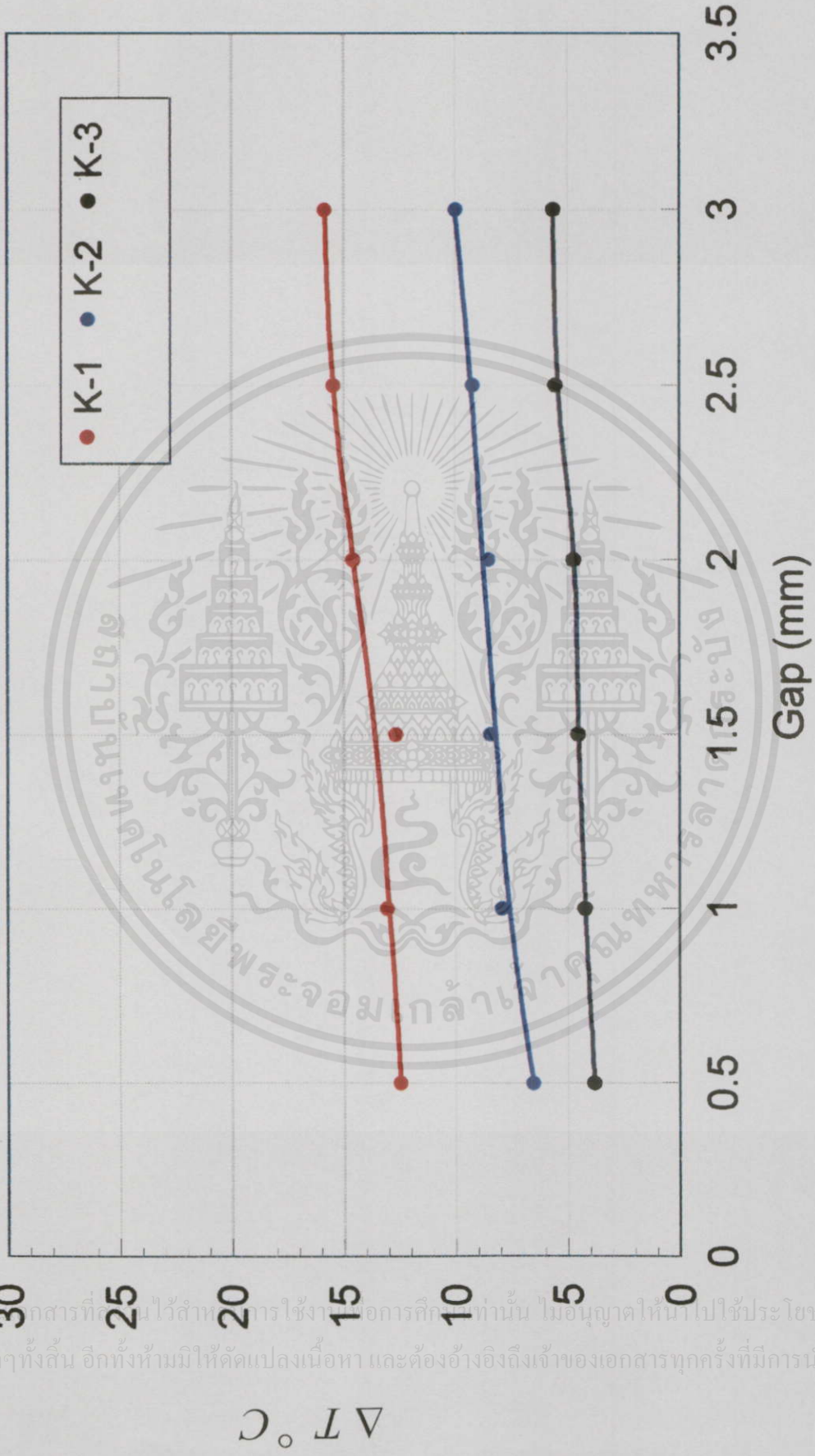
2. ประสิทธิภาพการทำความเย็นมีค่ามากที่สุดเมื่อค่า เมื่อช่องกระจายอากาศ (Gap) = 3.0  
mm มีความเอียงมุมท่อ = 6 องศา ทั้งในกรณีที่กล่าวคือเมื่อ ความดันทางเข้า = 4.5 bar การทำ  
ความเย็นได้สูงสุด ( $\Delta T$ ) =  $19.7^{\circ}\text{C}$  หรือประสิทธิภาพการทำความเย็นในท่อตามแนวแกนมีค่าเท่า  
กับ 68%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



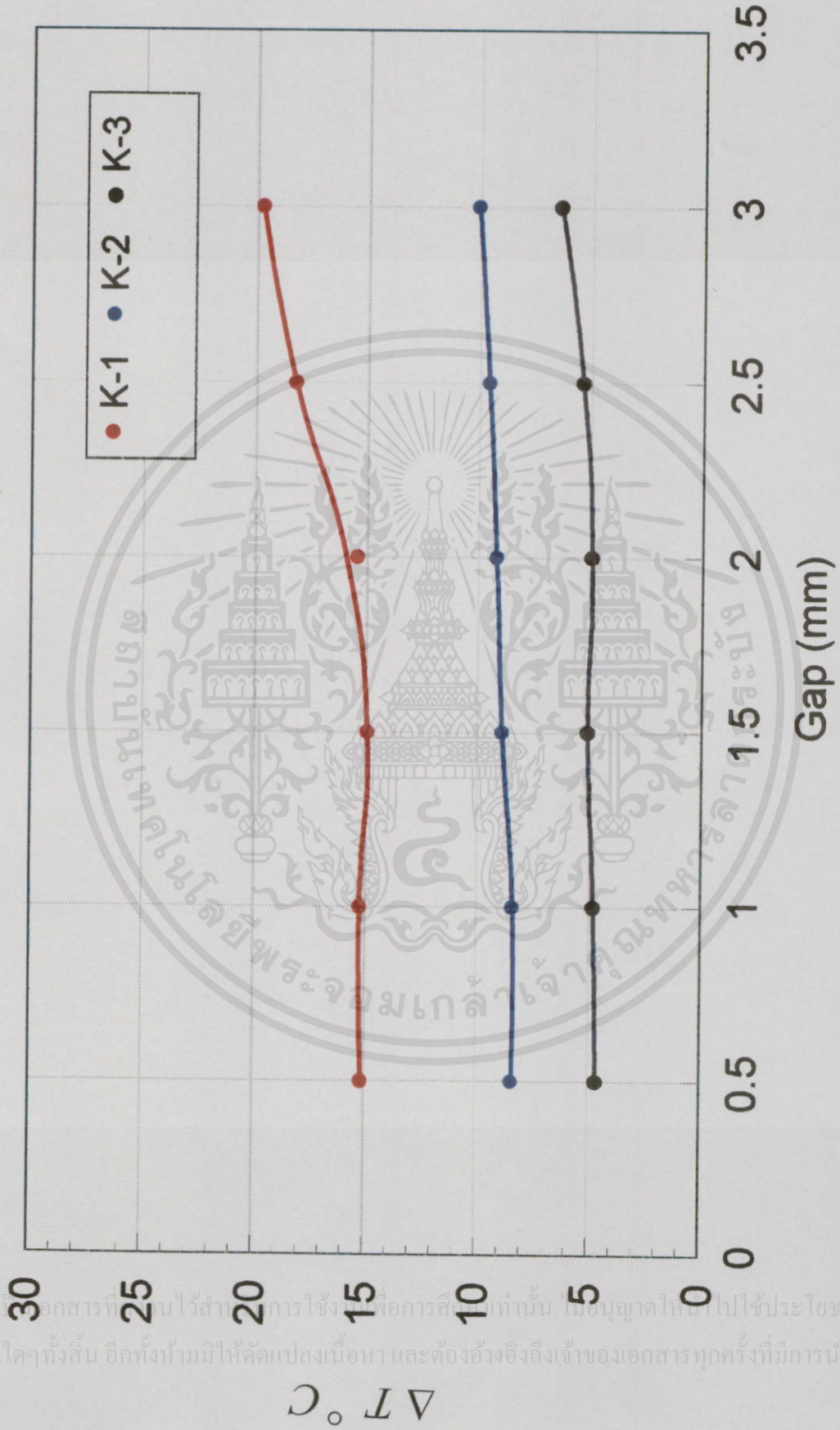
รูปที่ 4.10 อิทธิพลของระยะจายอากาศ (Gap) ขนาดต่างๆ มีผลต่อการลดลงของอุณหภูมิ ตำแหน่งการวัด T10 ที่ความดัน 4.5 bar ที่ความเยี่ยงมุมท่อ 6 องศา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษานั้น ไม่อนุญาตให้ไปใช้ประโยชน์ในการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.11 อิทธิพลของระยะอากาศ (Gap) ขนาดต่างๆ มีผลต่อการลดลงของอุณหภูมิ ตำแหน่งการวัด T6 ที่ความดัน 4.5 bar ที่ความเยี่ยงนมท่อ 6 องศา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ในการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.12 อิทธิพลของระยะกระจายอากาศ (Gap) ขนาดต่างๆ มีผลต่อการลดลงของอุณหภูมิ ตำแหน่งการวัด T2 ที่ความดัน = 4.5 bar ที่ความเยื้องมุมท่อ 6 องศา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่... เอกสารที่... ไว้สำหรับ... การใช้งาน... ที่การศึกษานั้น... ไม่อนุญาตให้... ไปใช้ประโยชน์... การค้า... ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.3.5 อิทธิพลของตำแหน่งการวัด ณ. T1-T10 กับช่องกระจายอากาศที่มีต่อการลดลงของอุณหภูมิ

รูปที่ 4.13 แนว K-1 วัดที่จุดกึ่งกลางท่อตำแหน่งการวัด T1-T10, แนว K-3วัดที่ผนังท่อตำแหน่งการวัด T2-T10 และแนว K-2 วัดที่แนวกึ่งกลางระหว่างแนว K-1 และ K3 ที่ตำแหน่งการวัด T2-T10 จะเห็นว่าอุณหภูมิตั้งที่แนวกึ่งกลางท่อ (K-1) จะมีค่าต่ำกว่าที่แนวอื่น ๆ อุณหภูมิที่แนวผนังท่อจะมีค่าสูงสุด แต่จะไม่มากกว่าอุณหภูมิอากาศที่ทางเข้า ( $29^{\circ}\text{C}$ ) ตำแหน่งที่อุณหภูมิจะต่ำที่สุดจะอยู่ที่แนวกึ่งกลางท่อหรือ K-1 เมื่อช่องกระจายอากาศ (Gap) = 1.0 mm

รูปที่ 4.14 แนว K-1 วัดที่จุดกึ่งกลางท่อตำแหน่งการวัด T1-T10, แนว K-3วัดที่ผนังท่อตำแหน่งการวัด T2-T10 และแนว K-2 วัดที่แนวกึ่งกลางระหว่างแนว K-1 และ K3 ที่ตำแหน่งการวัด T2-T10 จะเห็นว่าอุณหภูมิตั้งที่แนวกึ่งกลางท่อ (K-1) จะมีค่าต่ำกว่าที่แนวอื่น ๆ อุณหภูมิที่แนวผนังท่อจะมีค่าสูงสุด แต่จะไม่มากกว่าอุณหภูมิอากาศที่ทางเข้า ( $29^{\circ}\text{C}$ ) ตำแหน่งที่อุณหภูมิจะต่ำที่สุดจะอยู่ที่แนวกึ่งกลางท่อหรือ K-1 ที่ความดันทางเข้า = 4.5 bar เมื่อช่องกระจายอากาศ (Gap) = 2.0 mm

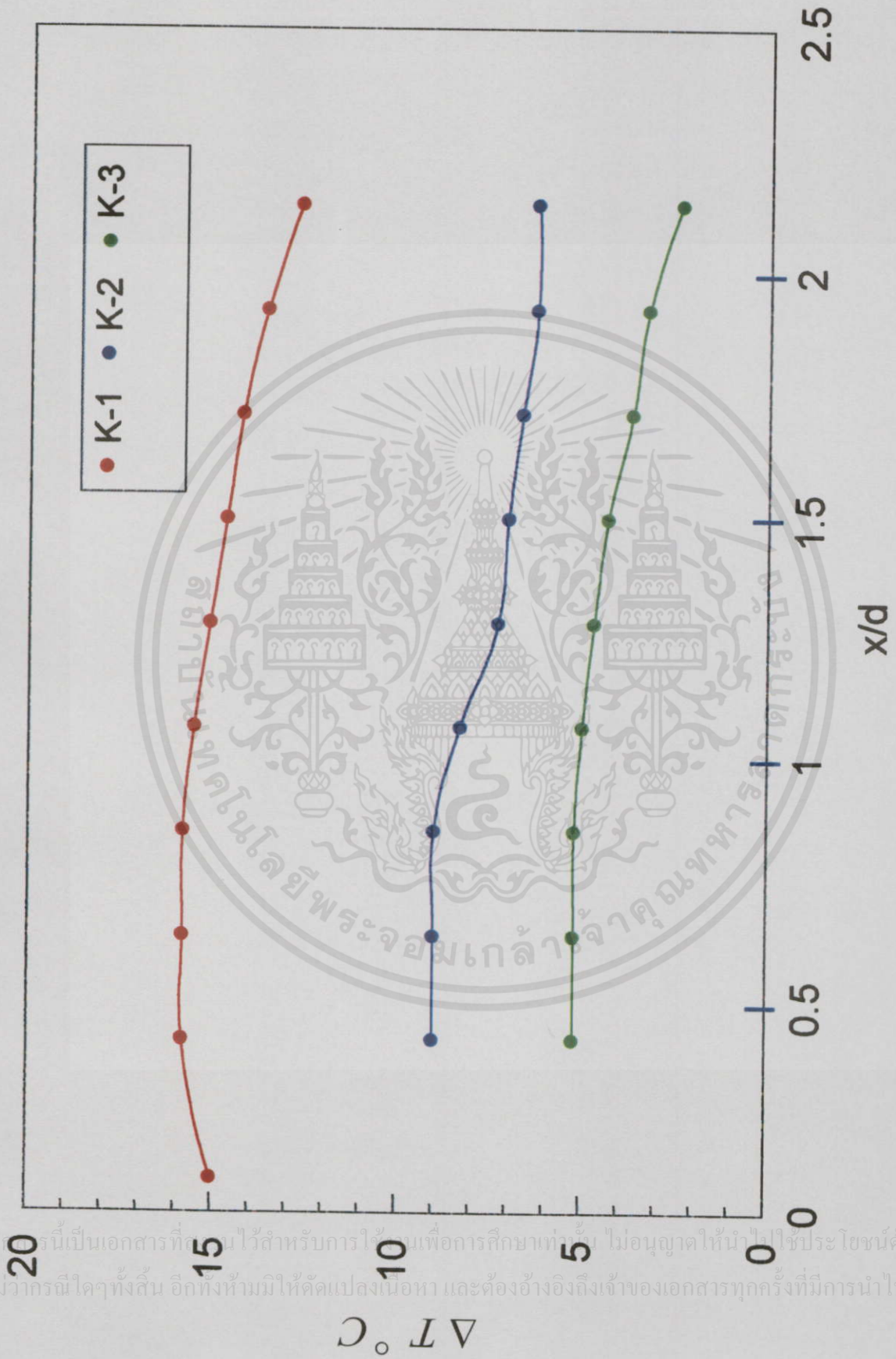
รูปที่ 4.15 แนว K-1 วัดที่จุดกึ่งกลางท่อตำแหน่งการวัด T1-T10, แนว K-3วัดที่ผนังท่อตำแหน่งการวัด T2-T10 และแนว K-2 วัดที่แนวกึ่งกลางระหว่างแนว K-1 และ K3 ที่ตำแหน่งการวัด T2-T10 จะเห็นว่าอุณหภูมิตั้งที่แนวกึ่งกลางท่อ K-1 จะมีค่าต่ำกว่าที่แนวอื่น ๆ อุณหภูมิที่แนวผนังท่อจะมีค่าสูงสุด แต่จะไม่มากกว่าอุณหภูมิอากาศที่ทางเข้า ( $29^{\circ}\text{C}$ ) ตำแหน่งที่อุณหภูมิต่ำที่สุดจะอยู่ที่แนวกึ่งกลางท่อที่ T2 หรือ  $x/d = 0.42$  ซึ่งจะมีประสิทธิภาพการทำความเย็น =  $19.7^{\circ}$  เมื่อช่องกระจายอากาศ (Gap) = 3.0 mm

จากการทดลองรูปที่ 4.3.13, รูปที่ 4.3.14 และรูปที่ 4.3.15 เราสามารถสังเกตได้ว่าอุณหภูมิกายในท่อออร์เทกซ์จะลดลง เมื่อมีอิทธิพลทางด้าน ความดันลม, ความเอียงมุมท่อ, ตำแหน่งการวัด และช่องกระจายอากาศ โดยเราสามารถสรุปโดยรวมได้ดังนี้

1. ค่า K-1, K-2 และ K-3 โดยที่ตำแหน่งที่อุณหภูมิต่ำที่สุดจะอยู่ที่แนวกึ่งกลางท่อหรือค่า K-1 เมื่อช่องกระจายอากาศ (Gap) = 1.0, mm 2.0 mm และ 3.0 mm ประสิทธิภาพการทำความเย็นจะสูงขึ้นอย่างชัดเจนมากที่สุดเมื่อ ความเอียงมุมท่อ = 6 องศา และความดันทางเข้า = 4.5 bar ที่มีตำแหน่งการวัด T2 ณ. การวัดค่า K1 และแนวโน้มช่องกระจายอากาศ (Gap)ที่เหมาะสมจะมีผลต่อการทำความเย็นมากขึ้นตามไปด้วย

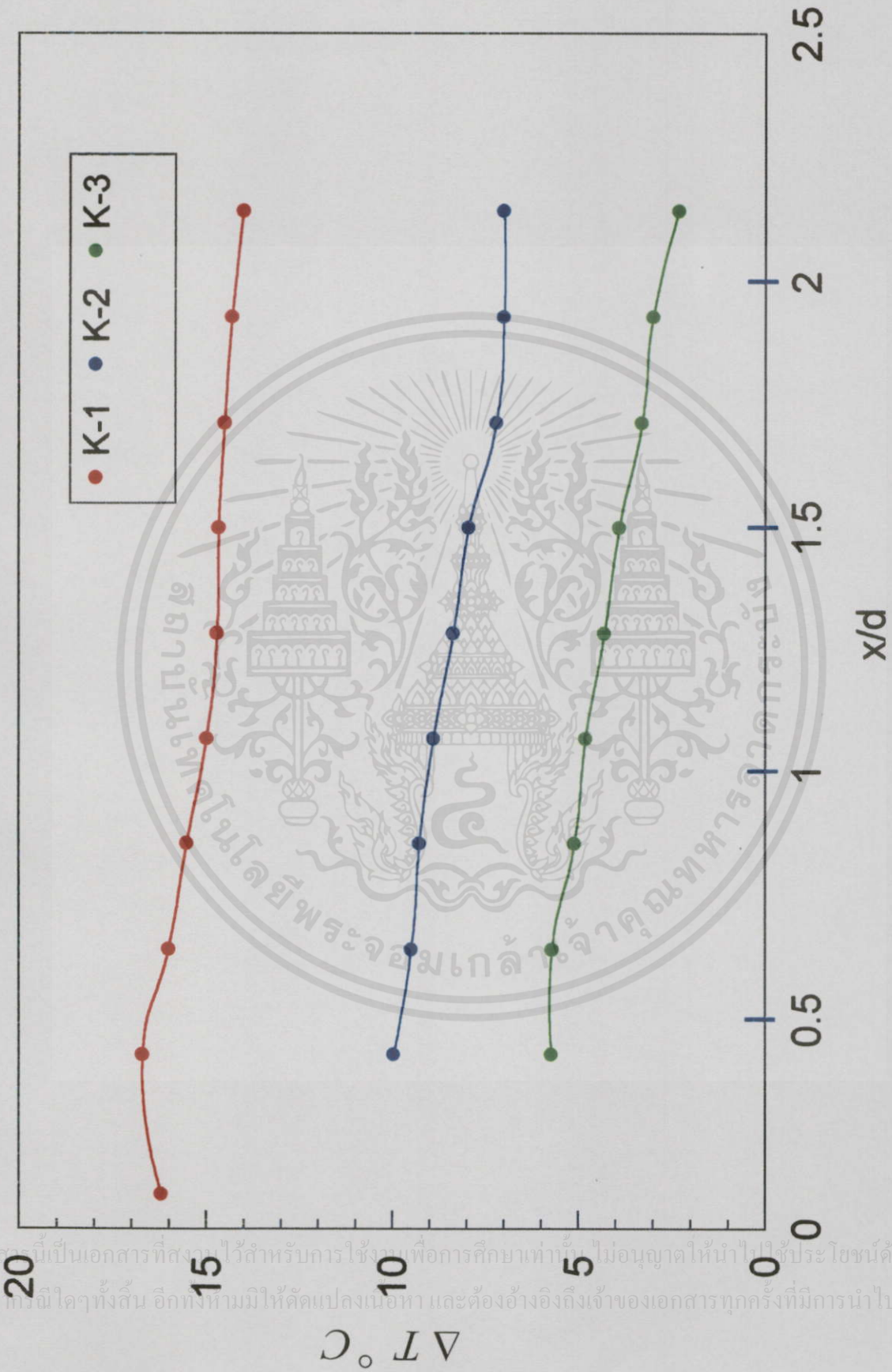
2. ประสิทธิภาพการทำความเย็นมีค่ามากที่สุดเมื่อค่า เมื่อช่องกระจายอากาศ (Gap) = 3.0 mm มีความเอียงมุมท่อ = 6 องศา ทั้งในกรณีที่กล่าวคือเมื่อ ความดันทางเข้า = 4.5 bar การทำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ความเย็นได้สูงสุด ( $\Delta T$ ) =  $19.7^{\circ}\text{C}$  หรือประสิทธิภาพการทำความเย็นในท่อตามแนวแกนมีค่าเท่ากับ 68%



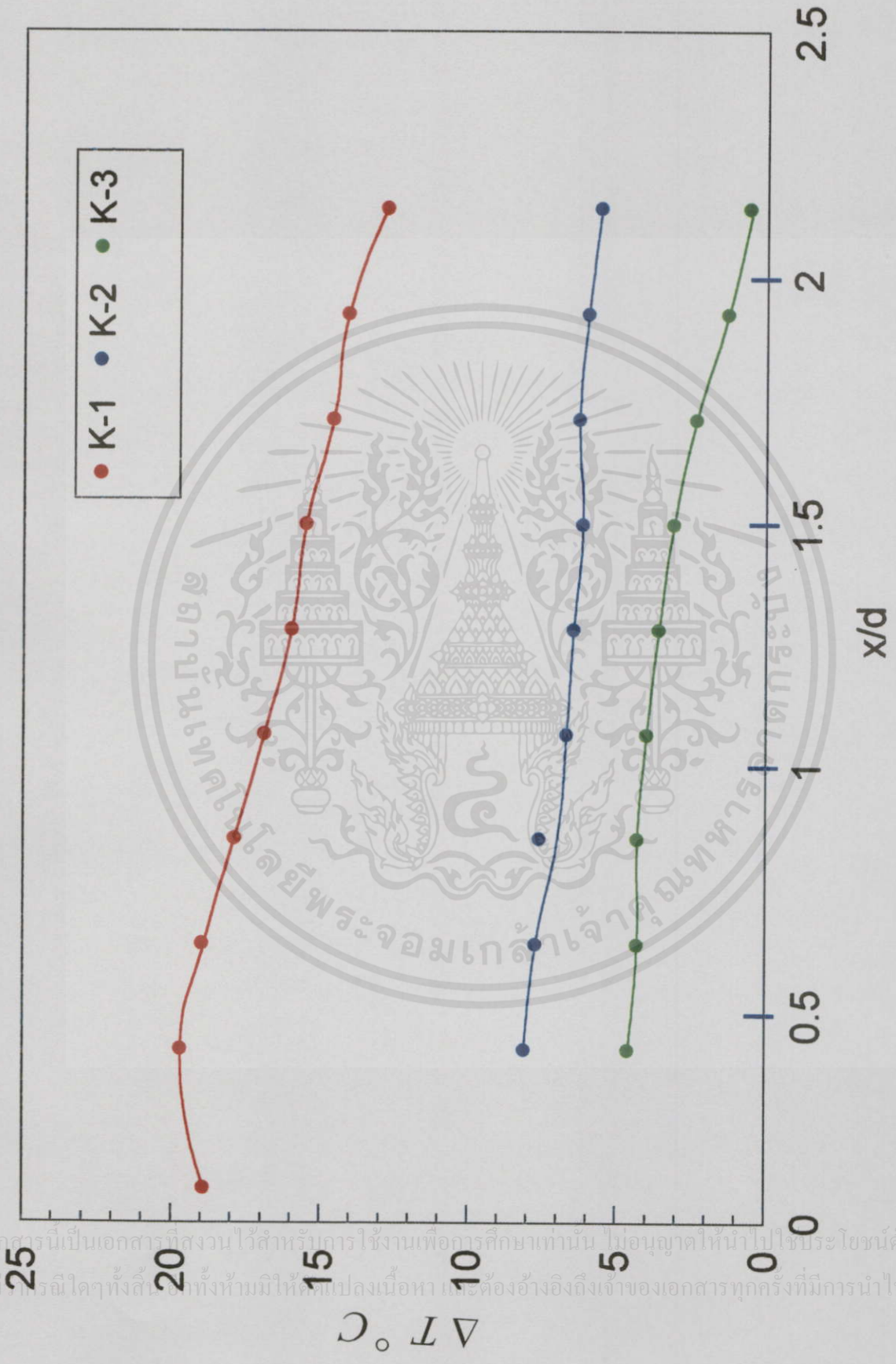
รูปที่ 4.13 อิทธิพลตำแหน่งการวัดต่างๆ มีผลต่อการลดลงของอุณหภูมิ ที่ช่องกระจายอากาศ (Gap) = 1.0 mm มีความดัน = 4.5 bar ที่ความเยี่ยงมุมท่อ = 6 องศา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นไว้สำหรับการใช้เรียนเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านอื่นๆ  
 ไม่วากรณ์ใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.14 อิทธิพลตำแหน่งการวัดต่างๆ มีผลต่อการลดลงของอุณหภูมิ ที่ช่องกระจายอากาศ (Gap) = 2.0 mm มีความดัน = 4.5 bar ที่ความเร็วลมที่ 6 องศา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านอื่น  
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.15 อิทธิพลตำแหน่งการวัดต่างๆ มีผลต่อการลดลงของอุณหภูมิ ที่ช่องกระจายอากาศ (Gap) = 3.0 mm มีความดัน = 4.5 bar

ที่ความเยี่ยงมุมท่อ = 6 องศา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านอื่น  
 ไม่มีการตีพิมพ์ใดๆทั้งสิ้น หากมีให้ตีพิมพ์เปลี่ยนเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 5

## บทสรุป

### 5.1 สรุปผลการทดลอง

งานวิจัยนี้ได้ทำการออกแบบและสร้างชุดทดลองการทำความเย็นแบบหมุนวน โดยใช้เครื่องต้นแบบของ Thomas และ Raymond [6] เป็นแนวทางในการกำหนดขนาดของอุปกรณ์ ชุดทดสอบเป็นอุปกรณ์ทำความเย็นแบบหมุนตามกัน โดยปิดทางอากาศออกเพื่อกักให้อากาศอยู่ภายในท่อให้นานขึ้น เพื่อให้การลดลงของอุณหภูมิอากาศภายในท่อมีค่าสูงขึ้น อากาศออกจากท่อโดยใช้แผ่นช่วยกระจายอากาศ การทดลองจะทำการทดสอบปัจจัยต่าง ๆ ที่มีผลต่อการลดลงของอุณหภูมิภายในท่ออุปกรณ์ทำความเย็น ได้แก่ ความดันอากาศที่ทางเข้า โดยสามารถปรับค่าความดันอากาศได้ระหว่าง 2 bar, 2.5 bar, 3.0 bar, 3.5 bar, 4.0 bar และ 4.5 bar ตามลำดับ การปรับองศาความเอียงมุมที่ปลายท่อเป็น 2, 4 หรือ 6 องศา และสุดท้ายปรับช่องกระจาย หรือ Gap เป็นระยะห่างระหว่าง 0.5 mm, 1 mm, 1.5 mm, 2 mm, 2.5 mm และ 3.0 ตามลำดับ

ผลการทดลองสรุปได้ดังนี้

1. เมื่อปรับค่าความดันอากาศที่ทางเข้าให้มียิ่งมากขึ้น จะทำให้การลดลงของอุณหภูมิมียิ่งมากขึ้นด้วย อธิบายได้ว่า เมื่อความดันที่ทางเข้าที่วอร์เทกซ์สูงขึ้น แรงดันและความเร็วที่ไหลผ่านหัวฉีดจะมีค่าสูงขึ้น มีผลให้อากาศที่ไหลผ่านหัวฉีดที่เข้าสู่ที่วอร์เทกซ์มีความเร็วสูงมากขึ้นและเกิดการหมุนวนภายในที่วอร์เทกซ์ที่มีความเร็วเชิงมุมที่สูงขึ้นตาม โดยเฉพาะที่บริเวณที่ใกล้ผนังท่อจะมีความเร็วเชิงมุมและอุณหภูมิที่สูงมากขึ้น ในขณะที่บริเวณกลางท่อจะมีความเร็วเชิงมุม และอุณหภูมิลดลงตามลงมา ทำให้เกิดผลต่างของการลดลงของอุณหภูมิที่สูงมากขึ้นตาม

2. เมื่อระยะห่างระหว่างช่องกระจายอากาศ (Gap) คงที่ ใช้ค่าความดันอากาศที่ทางเข้าเป็น 4.5 bar ปรับองศาความเอียงมุมของปลายท่อให้เพิ่มมากขึ้น จะทำให้การลดลงของอุณหภูมิมียิ่งมากขึ้นด้วยเราสามารถอธิบายได้ว่า ผลของการปรับมุมมีผลทำให้เกิดการหมุนวนที่บริเวณที่ปลายท่อมียิ่งมีความเร็วเชิงมุมที่สูงขึ้น จึงส่งผลให้การลดลงของอุณหภูมิสูงมากขึ้นตาม

3. ในแต่ละองศาความเอียงมุม ควรปรับค่าช่องกระจายอากาศ (Gap) ให้เหมาะสมจึงทำให้อุณหภูมิลดลงได้มากที่สุด เป็นที่น่าสังเกตว่า เมื่อองศาความเอียงมุมมีค่าน้อย (2 องศา) ควรปรับช่องกระจายอากาศ (Gap) ที่ค่าต่ำ ๆ และถ้าองศาความเอียงมุมมากขึ้น ควรปรับช่องกระจายอากาศ (Gap) มากตามด้วย

4. อุณหภูมิภายในท่ออุปกรณ์ทำความเย็นที่สร้างขึ้นนี้จะลดลงมากที่สุด เมื่อปรับความดันของอากาศที่ทางเข้า 4.5 bar ปรับองศาความเอียงมุมท่อเป็น 6 องศา ตำแหน่งที่อุณหภูมิลดลง

มากที่สุดอยู่ที่ระยะ  $x/D = 0.42$  mm อุณหภูมิลดลงได้สูงสุด  $19.7$  °C หรือที่ตำแหน่ง T2 เมื่ออากาศเข้ามีอุณหภูมิที่อวอร์เท็กซ์เท่ากับ  $29$  °C

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

ข้อเสนอแนะเชิงทดลองของการลดลงอุณหภูมิในอุปกรณ์หล่อเย็นแบบหมุนวน (Vortex Cooling Device) มีข้อเสนอแนะดังต่อไปนี้

1. อากาศที่เข้ามาภายในท่อวอร์เท็กซ์ ควรที่จะติดตั้งตัวกรองน้ำ ถ้าเกิดไม่ได้ติดตั้งจะทำให้เกิดผลการทดลองที่คลาดเคลื่อนได้
2. ตำแหน่งการวัดอุณหภูมิที่เหมาะสมและละเอียดอาจคลาดเคลื่อนได้จากสเกลที่ติดตั้งไว้ ซึ่งเป็นผลมาจากการวัดที่ไม่คงที่
3. อากาศทางเข้าภายในท่อวอร์เท็กซ์ อุณหภูมิภายในทางเข้าจะเปลี่ยนแปลงตลอดเวลาซึ่งก็เป็นเรื่องปกติ แต่การวัดอุณหภูมิภายในอาจทำให้เกิดการผิดพลาดได้
4. การวัดอุณหภูมิภายในท่อวอร์เท็กซ์ควรจะวัดทาง T1 มาถึง T10 ดังนั้นการวัดอาจจะทำให้เกิดผลกระทบต่อการหมุนวน ซึ่งเป็นผลทำให้เกิดการผิดพลาดได้

## 5.3 ประโยชน์ที่ได้รับ

เราสามารถนำงานวิจัยนี้ไปออกแบบและนำไปประยุกต์ใช้งาน เพื่อประหยัดพลังงาน การทำความเย็นที่มีการใช้งานน้ำหนักเบาเปลืองเนื้อที่น้อยมาก ไม่ใช่สารทำความเย็น ราคาต้นทุนการผลิตที่ต่ำมากเมื่อเทียบกับการทำความเย็นแบบชนิดใช้สารทำความเย็น เทคนิคการทำไม่ยุ่งยาก มีความปลอดภัยสูง เช่น การนำไปใช้การทำความเย็นเครื่องบิน การทำความเย็นเครื่องตัดโลหะ การทำความเย็นบนรถไฟ เป็นต้น

## 5.4 แนวทางวิจัยในอนาคต

ในการปรับปรุงและประยุกต์ใช้งานในอนาคตของอุปกรณ์หล่อเย็นแบบหมุนวน (Vortex Cooling Device) เราสามารถวิจัยในอนาคตดังต่อไปนี้

1. อุปกรณ์หล่อเย็นแบบหมุนวน (Vortex Cooling Device) ควรที่จะเพิ่มองศาความเอียงมุมของท่อมากกว่าที่วิจัยนี้
2. อุปกรณ์หล่อเย็นแบบหมุนวน (Vortex Cooling Device) รูปทรงควรเพิ่มความยาวมากขึ้น (ถ้าเป็นไปได้ควรเปรียบเทียบกับท่ออุปกรณ์หล่อเย็นแบบหมุนวน ทั้งเพิ่มความยาวท่อของวอร์เท็กซ์ และลดความยาวท่อ)
3. ควรเพิ่มช่องกระจายอากาศ (Gap) ให้มากกว่า  $3$  mm

4. ทดลองเพิ่มและลดขนาดของตัวช่วยแพร่อากาศ (Diffuser Plate และ End Plate) ให้มีขนาดต่างๆ เพื่อศึกษาถึงความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงขนาด รูปร่างในลักษณะต่างๆ จะมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงสัดส่วนการลดลงของอุณหภูมิว่ามีค่าเพิ่มขึ้นหรือลดลง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บรรณานุกรม

- [1] George's Ranque. **Experiences on Expansion in a Vortex with Simultaneous Exhaust of Hot Air and Cold Air.** Le Journal de Physic et at Radium. Paris (In French) Vol. 7 No. 4, June 1933, pp. 112 -114.
- [2] Rudolph Hilsch. **The Use of the Expansion of Gases in a Centrifugal Field as a Cooling Process.** The Review of Scientific Instruments. Vol. 18 No.2, February 1947, pp.108-113.
- [3] Fulton. C.D. **Ranque's Tube.** ASTM Refrigeration Engineering. Vol. 58, May 1950, pp.473-479
- [4] Schultz-Grunow. F. **Turbulenter Warmedurchgang im Zentiifugalfeld.** Forsch. Ing. Vol.17 No.3, 1951, pp. 65-76.
- [5] Martynovskii V.S., Alekseev V.P. **Investigation of the Vortex Thermal Separation Effect for Gases and Vapors.** Soviet Phys., 1957, pp. 2233-2243
- [6] Thomas A. Blatt, Raymond B. Trusch. **An Experimental Investigation of an Improved Vortex Cooling Device.** New York : American Society of Mechanical Engineering. Paper Number 62-WA-200, October 1962.
- [7] Linderstrom-Lang C.U. **Gas Separation in the Ranque - Hilsch Vortex Tube.** Int. Journal of Heat Heat Transfer 7 ,1964 , pp.1195-1206.
- [8] Takahama H. **Studies on Vortex Tubes.** Bull. JSME, 1965, pp. 433-440.
- [9] Williams. A. **The Cooling of Methane with Vortex Tube.** Journal of Mechanical Engineering Science Volume 13 No. 6, 1971, pp. 365-375.
- [10] Hartnett J. P. , Eckert E. R. G. **Experimental Study of the Velocity and Temperature Distribution in a High- Velocity Vortex- Tube Flow. Transition.** ASME Series C, J. Heat Transfer 79, 1976, pp. 751-758.
- [11] Marshall J. **Effect of Operating Conditions. Physical Sine and Fluid Characteristics on the Gas Separation Performance of the Linderstrom-Lang Vortex Tube.** Int. J. Heat Mass Transfer 20, 1977 , pp. 227-231.
- [12] Stepphan. K., Lin S., Durst M., Huang F., seheer D. **A Similarity Relation for Energy Separation in a Vortex Tube.** Int. J. Heat Mass Transfer Vol.27 No.6, 1984, pp. 911-920.

- [13] นักสิทธิ์ ภูวัฒนาศัย. **ทอเวอร์เทกซ์**. วิศวกรรมสารแห่งประเทศไทย, มิถุนายน 1985
- [14] Promvong. P. **Numerical Simulation of Turbulent Compressible Vortex-Tube Flow**. San francisco California : ASME/JSME Joints Fluid Engineering, 1999.
- [15] Frohlingsdorf.W., Unger H. **Numerical Investigations of The Compressible Flow and The Energy Separation in the Ranque - Hilsch Vortex Tube**. Int. J. Heat Mass Transfer 42, 1999, pp. 415-422.
- [16] Lay. J.M. **Experimental and Analytical Study Of Vortex Flow Temperature Separation by Superposition of Spiral and Axial Flows**. ASTM. Part I-II. No. 58-SA-71,58-A-90.,
- [17] Deissler. R. G. , Perlmutter M. **An Analysis of the Energy Separation in Laminar and Turbulent Compressible Vortex Flows**. Heat Transfer and Fluid Mechanics Institute. 1958.
- [18] Savino J.M. ,Ragsdale. R.G. **Some Temperature and Pressure Measurements in Confined Vortex Fields**. ASTM. No 60-SA-4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก

## ส่วน ก

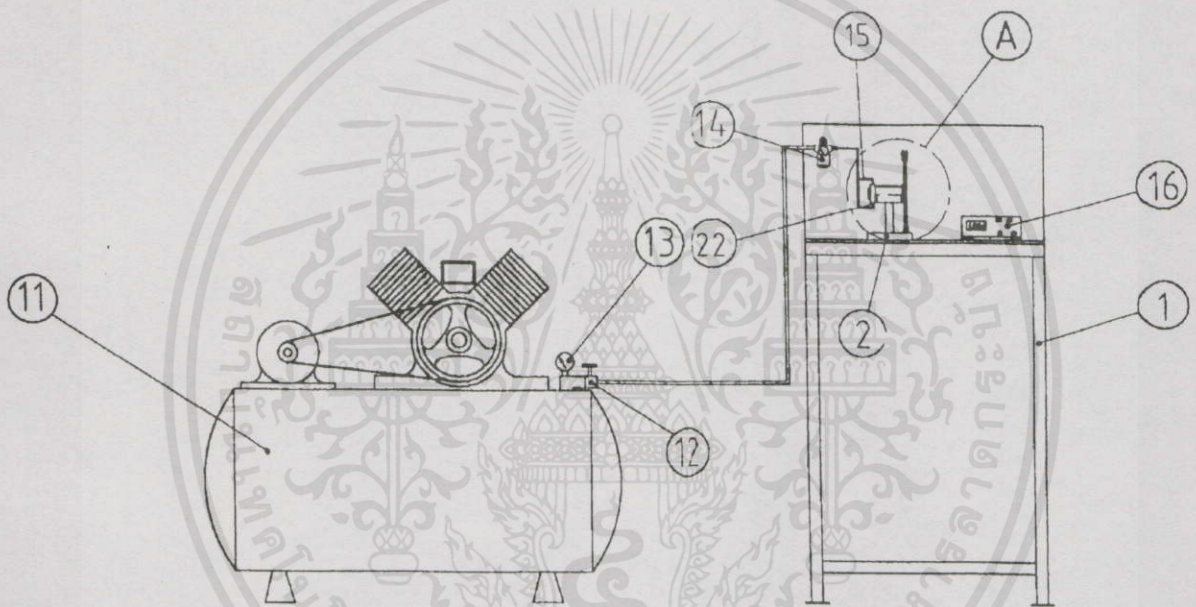
## แสดงชิ้นส่วนอุปกรณ์การหล่อเย็นแบบหมุนวน

ตารางที่ ก.1 Part list Vortex Cooling Test

22	AIR LINK M10x0.25		2		BRONZE
21	NUT M6	DIN934	4		U- ST 37
20	SEAL 12x2		1		RUBBER
19	WASHERA 6.4	DIN125	8		U- ST 37
18	BOLT M12x20	DIN931	4		U- ST 37
17	NUT M6	DIN934	4		U- ST 37
16	MEASURE TESTO400		1		
15	AIR WIRES 6		1		
14	AIR CLEANER		1		
13	PRESSURE GAGUE		1		
12	VALUE		1		
11	AIR SUPPLY		1		
10	WASHER 10		24	4 MECH32208-10	PLASTIC
9	BOLT 1/4x120		4	4 MECH32208-10	TAINLESS
8	STRAP 20x40x2		8	4 MECH32208-10	TAINLESS
7	VORTEX TUBE 38x90		3	4 MECH32207	TAINLESS
6	BOLT M12x1.25		1	MECH32205-06	BRONZE
5	END PLATE 250x3		1	MECH32205-06	TAINLESS
4	VORTEX CHAMBER 75x25		1	4 MECH32204	BRONZE
3	DIFFUSER PLATE 250x9		1	4 MECH32203	TAINLESS
2	STAND 150x150x120		1	4 MECH32201-02	U- ST 37
1	WORK TABLE 400x700x1600		1	4 MECH32201-02	U- ST 37
No.	DISCRPTION	STANDARD	PART	DRAWING No	MATERIAL
Title:		Part List			
Dimension:		Vortex Cooling Test			
		Millimeter			

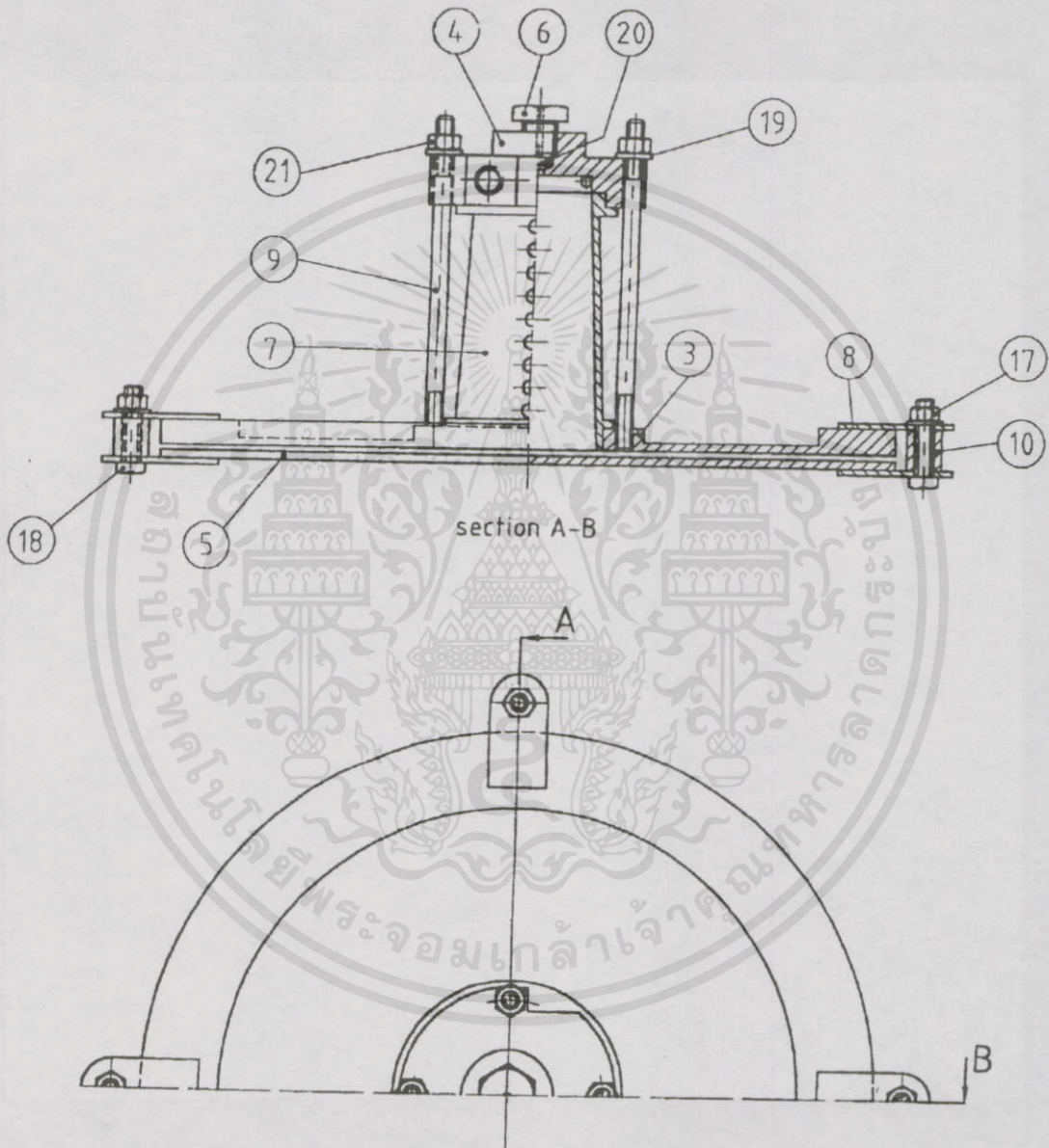
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่ควรนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ก.1 Assembly Vortex Cooling Test

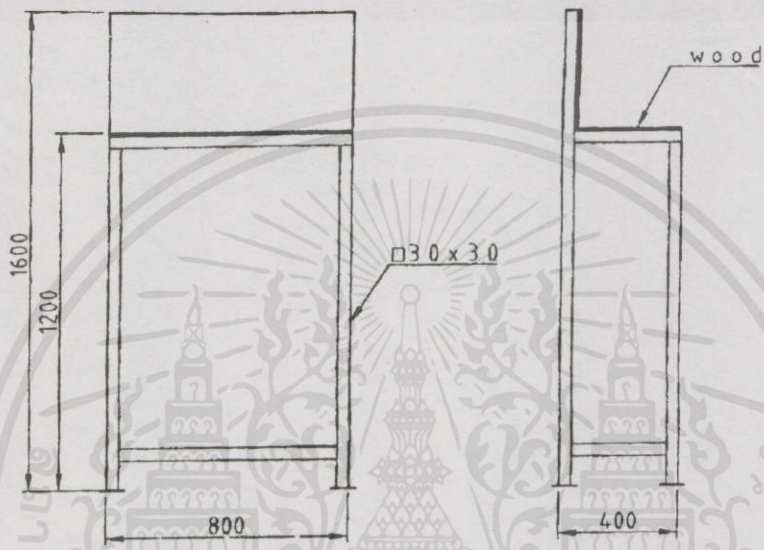
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



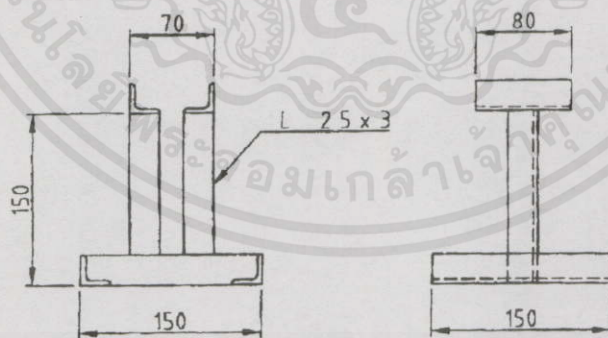
รูปที่ ก.2 Detail A Vortex Cooling

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1

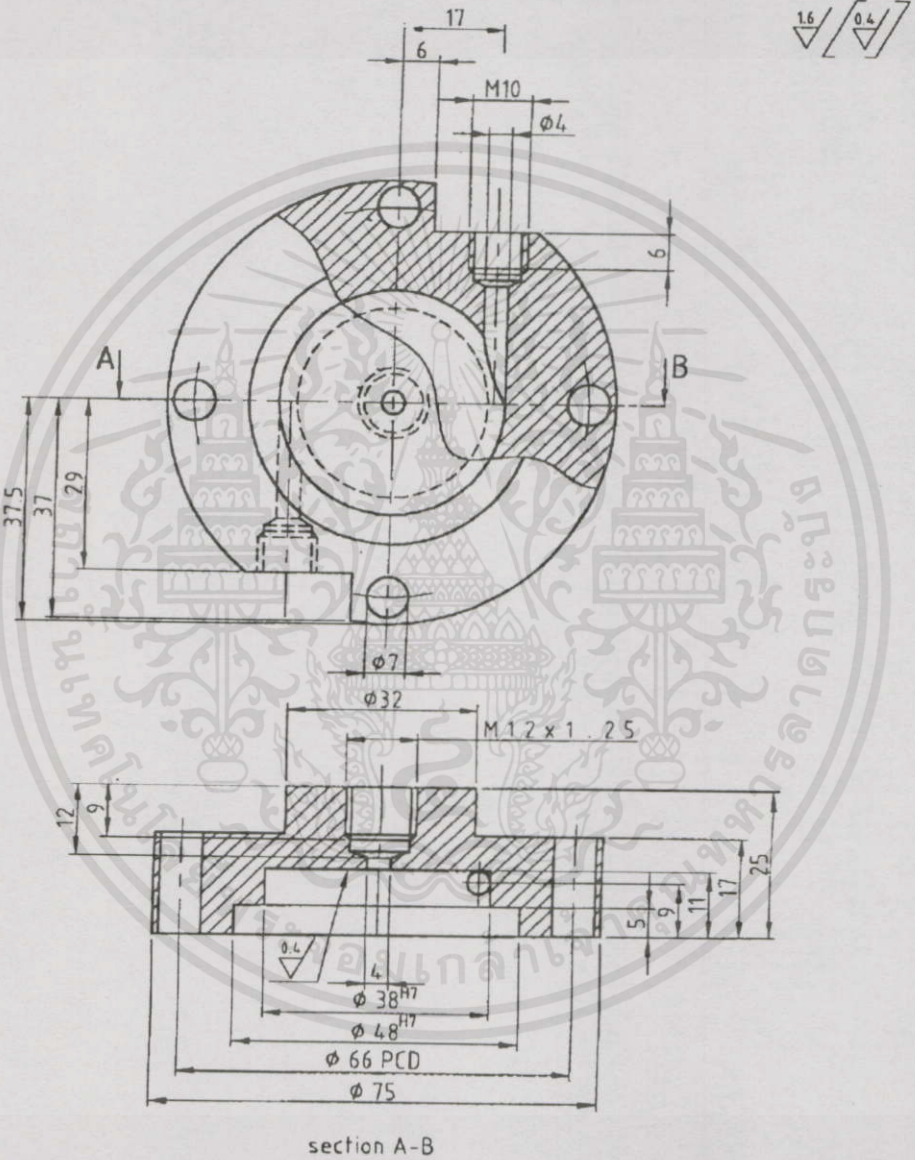


2



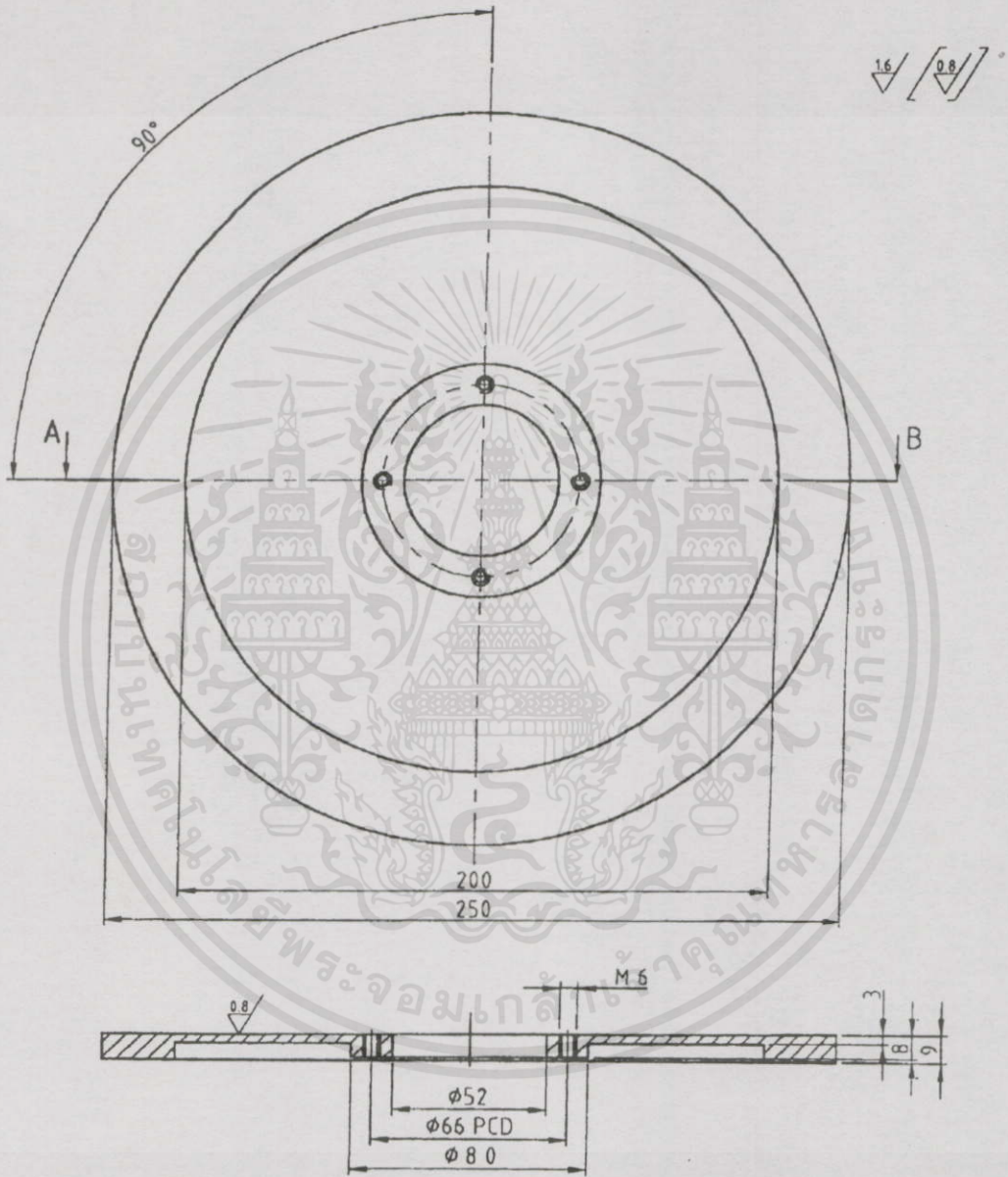
รูปที่ ก.3 1. Work Table 2. Stand

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ก.4 Vortex Chambar

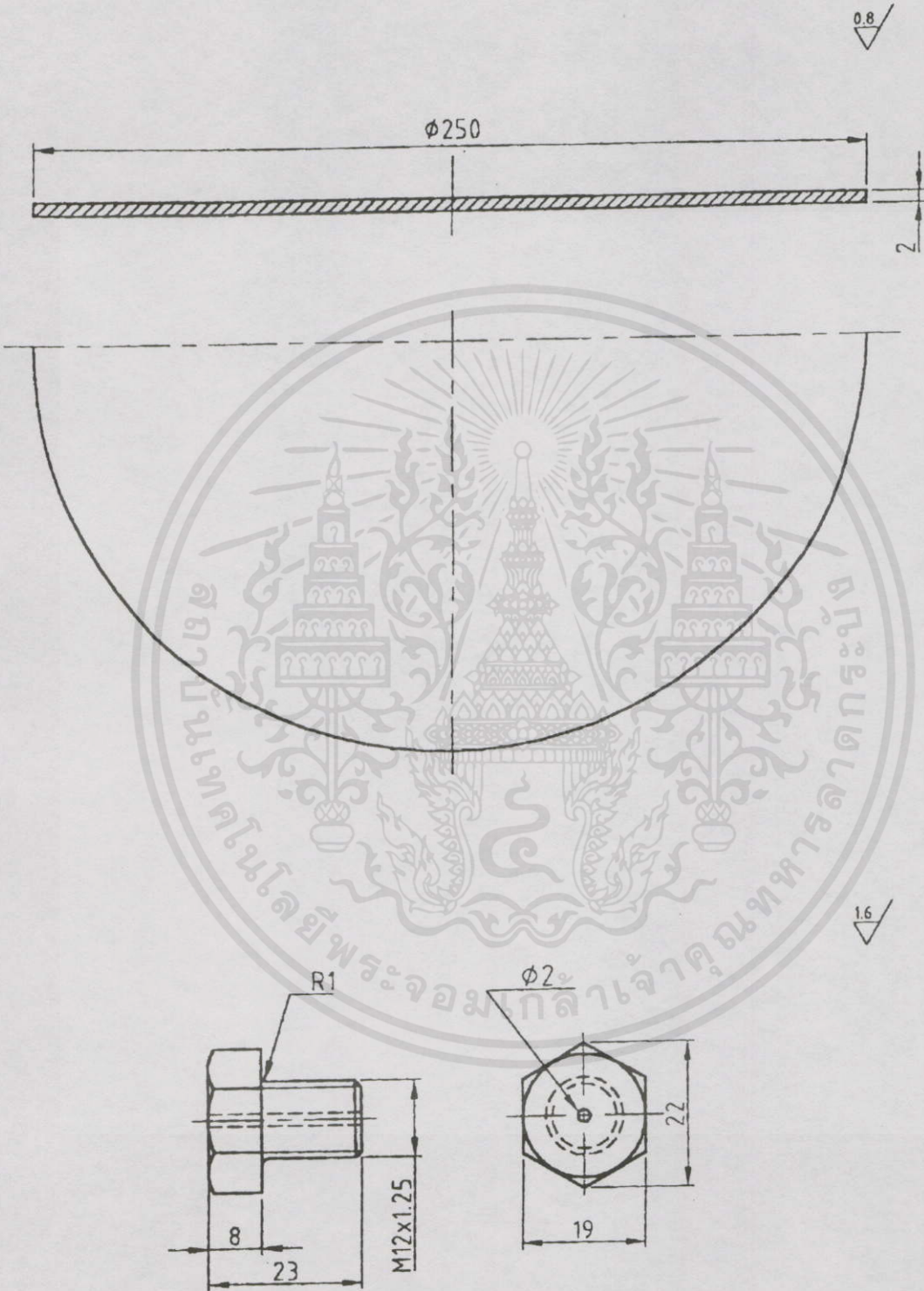
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



section A-B

รูปที่ ก.5 Diffuser Plate

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ ก.6 1. Bolt 2. End Plate

## ส่วน ข

### ตารางแสดงผลการทดลองอุปกรณ์การหล่อเย็นแบบหมุนวน

ตารางที่ ข.1 ผลการทดลองความเย็งมูมที่ 2 องศา, ความดัน 2 bar,  $T_{01} = 29 \text{ }^{\circ}\text{C}$

อุณหภูมิ Temp. ( $^{\circ}\text{C}$ )	ตำแหน่ง จุดวัด	ระยะ GAP					
		0.5 mm	1.0 mm	1.5 mm	2.0 mm	2.5 mm	3.0 mm
T1	K1	20.80	20.60	20.40	20.20	20.50	20.80
T2	K1	20.10	18.80	19.00	19.10	19.40	19.50
	K2	23.50	23.30	23.40	23.60	23.70	23.60
	K3	28.20	25.90	26.10	27.20	27.90	28.80
T3	K1	20.10	19.80	19.20	19.10	19.50	19.90
	K2	24.00	23.70	23.60	24.20	24.40	24.50
	K3	28.10	26.50	26.60	27.20	27.80	28.50
T4	K1	20.40	20.30	19.10	19.60	19.90	20.10
	K2	24.60	23.60	23.80	24.80	25.00	25.20
	K3	27.20	27.00	26.90	27.50	28.50	28.70
T5	K1	20.60	20.70	19.30	19.70	20.20	20.20
	K2	25.10	24.80	24.60	25.20	25.20	25.80
	K3	27.60	27.30	27.40	28.20	28.60	28.70
T6	K1	21.00	20.30	19.60	19.00	20.10	20.30
	K2	25.20	25.00	24.80	25.40	25.30	25.80
	K3	27.80	27.20	27.60	28.10	28.70	29.00
T7	K1	20.20	20.30	19.20	19.60	20.20	20.50
	K2	25.20	24.90	24.90	25.30	25.70	26.10
	K3	28.60	27.50	27.80	28.40	28.80	28.90
T8	K1	20.40	20.40	19.30	19.70	20.20	20.50
	K2	25.8	25.10	25.00	25.70	26.20	26.60
	K3	28.50	28.10	27.90	28.70	29.00	29.10
T9	K1	20.60	20.70	19.50	19.80	20.20	20.60
	K2	25.90	25.30	25.10	25.80	26.10	26.70
	K3	28.50	28.40	28.50	28.70	28.90	29.20
T10	K1	20.10	20.30	19.30	20.10	19.60	20.50
	K2	25.80	25.00	25.10	25.50	26.00	26.20
	K3	28.60	28.40	28.60	28.80	28.90	29.10

ตารางที่ ข.2 ผลการทดลองความเยี่ยงมูมท่อ 2 องศา, ความดัน 2.5 bar,  $T_{01} = 29 \text{ }^{\circ}\text{C}$

อุณหภูมิ Temp. ( $^{\circ}\text{C}$ )	ตำแหน่ง จุดวัด	ระยะ GAP					
		0.5 mm	1.0 mm	1.5 mm	2.0 mm	2.5 mm	3.0 mm
T1	K1	19.50	20.10	19.40	19.00	19.50	20.10
T2	K1	18.80	18.10	18.00	18.20	18.70	18.60
	K2	23.80	23.20	23.20	23.50	23.90	24.50
	K3	27.20	25.00	24.60	25.60	27.00	27.90
T3	K1	19.30	18.90	18.40	18.40	18.60	18.80
	K2	24.00	23.00	22.80	22.90	23.60	23.70
	K3	27.20	26.80	26.40	26.80	27.50	28.20
T4	K1	19.50	19.60	18.60	18.80	19.30	19.40
	K2	24.40	24.00	23.80	24.10	24.50	24.60
	K3	26.80	26.50	26.30	27.10	27.60	28.30
T5	K1	20.00	20.20	18.90	19.00	19.60	19.60
	K2	24.70	24.60	24.10	24.20	24.60	24.50
	K3	26.90	27.10	26.70	26.80	27.00	27.90
T6	K1	20.20	19.50	19.30	18.20	19.40	19.80
	K2	25.00	25.10	24.20	24.80	25.20	25.60
	K3	27.10	27.00	27.10	27.60	27.80	28.40
T7	K1	19.60	19.60	19.00	19.10	19.50	19.80
	K2	24.5	24.60	24.40	24.80	24.70	24.80
	K3	27.20	27.50	26.40	26.80	26.90	27.70
T8	K1	20.10	19.80	18.80	19.20	19.70	20.00
	K2	24.70	24.30	24.50	23.80	24.00	24.50
	K3	27.50	27.00	26.80	27.20	28.10	28.70
T9	K1	19.90	20.00	19.10	19.30	19.50	20.20
	K2	25.30	25.40	24.70	25.20	24.80	24.90
	K3	27.30	27.10	27.00	27.30	27.80	28.50
T10	K1	20.10	19.80	18.90	19.40	19.40	20.40
	K2	25.20	24.80	24.90	25.60	26.10	26.00
	K3	27.50	26.80	26.80	27.20	27.70	28.90

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.3 ผลการทดลองความเยี่ยงมูมท่อ 2 องศา, ความดัน 3.0 bar,  $T_{01} = 29 \text{ }^{\circ}\text{C}$

อุณหภูมิ Temp. ( $^{\circ}\text{C}$ )	ตำแหน่ง จุดวัด	ระยะ GAP					
		0.5 mm	1.0 mm	1.5 mm	2.0 mm	2.5 mm	3.0 mm
T1	K1	18.50	19.30	18.30	18.50	18.00	18.80
T2	K1	17.80	17.30	17.40	18.40	18.10	17.50
	K2	24.60	23.80	23.70	24.50	24.60	24.40
	K3	27.3	27.1	27.2	27.7	27.5	28.2
T3	K1	18.2	17.7	17.6	17.4	17.8	18
	K2	25	24.3	23.9	24.5	24.6	24.5
	K3	27.6	27.2	27.2	26.8	27.2	27.9
T4	K1	18.4	18.5	17.9	18.1	18.5	18.6
	K2	24.8	24.5	24.3	24.4	24.7	24.8
	K3	27.6	27.7	26.9	27.3	27.8	28.4
T5	K1	19.2	19.4	18	18.4	19.1	18.6
	K2	24.7	24.2	24.2	24.5	24.4	24.4
	K3	27.8	27.8	27.3	28	27.8	28.3
T6	K1	19.3	18.6	18.5	17.7	18.3	19.3
	K2	25.1	24.3	23.7	23.4	24.1	24
	K3	27.1	26.6	26.8	27.2	27.7	28.1
T7	K1	18.9	18.9	18.2	18.3	18.8	19.5
	K2	24.2	24.3	24.2	24.5	25.1	24.5
	K3	27.4	26.8	26.7	27.3	27.5	28.5
T8	K1	19.6	19.2	18.2	18.7	20.2	19.6
	K2	24	24.1	24.1	24.3	23.9	24.5
	K3	27.5	27.2	27.1	27.6	28.2	28.6
T9	K1	19.6	19.4	18.4	18.9	19.1	19.8
	K2	25.2	24.8	25.5	24.5	25	25.1
	K3	28.2	27.8	27.8	28.2	28.8	28.8
T10	K1	19.7	19.4	18.4	18.8	19.2	19.7
	K2	23.2	24.2	24	24.3	24.5	24.3
	K3	28.7	28.2	28.5	28.7	29.1	29

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.4 ผลการทดลองความเย็งมูมที่ 2 องศา, ความดัน 3.5 bar,  $T_{01} = 29 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 

อุณหภูมิ Temp. ( $^{\circ}\text{C}$ )	ตำแหน่ง จุดวัด	ระยะ GAP					
		0.5 mm	1.0 mm	1.5 mm	2.0 mm	2.5 mm	3.0 mm
T1	K1	17.90	18.70	17.70	18.00	18.20	18.40
T2	K1	17.20	16.70	17.20	17.60	17.80	17.1
	K2	23.50	23.40	23.5	23.60	23.50	23.60
	K3	26.20	25.80	25.90	26.10	26.30	26.70
T3	K1	17.30	16.90	16.80	17.90	17.90	17.6
	K2	23.40	23.20	23.30	23.80	23.50	23.60
	K3	26.30	26.00	26.10	26.50	26.70	26.60
T4	K1	17.60	17.60	17.10	18.10	18.10	17.80
	K2	23.30	23.20	23.20	23.50	23.50	23.40
	K3	26.50	26.40	26.40	26.60	27.00	27.30
T5	K1	18.50	18.30	17.40	18.20	18.30	18.90
	K2	23.80	23.80	23.40	23.60	23.50	23.70
	K3	26.60	26.30	26.30	26.50	27.00	26.90
T6	K1	18.40	18.10	17.50	18.30	18.60	18.40
	K2	24.00	24.10	23.80	24.10	24.10	24.30
	K3	27.10	26.50	26.80	27.10	27.30	27.50
T7	K1	18.60	18.50	17.60	18.40	18.50	18.50
	K2	24.20	24.30	24.20	24.60	24.50	24.80
	K3	27.30	27.20	27.10	27.50	27.70	28.00
T8	K1	19.20	18.80	17.60	18.50	18.50	18.80
	K2	24.00	24.10	23.90	24.30	24.80	25.00
	K3	27.40	27.70	27.10	27.30	27.50	27.70
T9	K1	19.00	19.20	17.90	18.50	18.70	18.90
	K2	23.90	24.30	24.10	24.50	24.20	24.30
	K3	26.80	27.00	26.70	26.80	27.20	27.10
T10	K1	18.70	19.30	18.10	18.70	18.20	19.00
	K2	23.80	23.80	23.70	24.10	24.10	24.00
	K3	27.10	26.80	26.60	26.80	27.20	27.60

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.5 ผลการทดลองความเย็งมูมต่อ 2 องศา, ความดัน 4.0 bar,  $T_{01} = 29 \text{ }^{\circ}\text{C}$

อุณหภูมิ Temp. ( $^{\circ}\text{C}$ )	ตำแหน่ง จุดวัด	ระยะ GAP					
		0.5 mm	1.0 mm	1.5 mm	2.0 mm	2.5 mm	3.0 mm
T1	K1	17.20	18.00	16.80	17.50	18.20	18.40
T2	K1	16.80	16.40	16.30	17.20	17.70	17.00
	K2	22.50	22.20	22.10	22.70	22.80	23.00
	K3	25.80	25.60	25.70	26.00	26.10	26.30
T3	K1	17.10	16.50	16.50	17.40	17.80	16.90
	K2	22.60	22.40	22.50	22.70	22.90	23.10
	K3	26.00	25.70	25.40	26.10	26.00	26.00
T4	K1	17.20	17.00	16.40	17.30	18.00	17.20
	K2	22.40	22.30	22.30	22.50	22.80	23.30
	K3	25.90	25.00	26.30	26.30	26.80	26.70
T5	K1	17.70	17.30	16.60	17.50	18.20	17.40
	K2	23.30	23.10	23.00	23.50	23.70	23.80
	K3	26.20	26.00	25.90	26.40	26.70	26.70
T6	K1	18.00	17.90	16.80	17.60	18.40	17.60
	K2	23.60	23.20	23.10	23.50	23.70	23.90
	K3	26.80	26.30	26.30	26.50	26.80	27.10
T7	K1	18.50	17.70	17.10	17.70	18.50	17.80
	K2	24.00	23.50	23.40	23.50	23.90	24.20
	K3	26.90	26.50	26.60	26.70	26.80	27.20
T8	K1	18.80	17.90	17.20	17.90	18.60	18.00
	K2	24.20	24.30	24.10	24.50	24.70	24.60
	K3	27.30	26.80	26.70	27.20	27.50	27.70
T9	K1	19.40	18.30	17.60	17.90	18.70	18.20
	K2	24.10	24.00	23.90	24.30	24.90	25.20
	K3	27.50	27.40	27.50	27.60	27.80	28.20
T10	K1	19.40	18.40	17.70	18.20	18.80	18.20
	K2	24.00	24.30	24.50	24.50	24.60	24.40
	K3	27.70	27.50	27.40	27.60	28.40	28.80

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.6 ผลการทดลองความเยี่ยงมูมที่ 2 องศา, ความดัน 4.5 bar,  $T_{01} = 29 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 

อุณหภูมิ Temp. ( $^{\circ}\text{C}$ )	ตำแหน่ง จุดวัด	ระยะ GAP					
		0.5 mm	1.0 mm	1.5 mm	2.0 mm	2.5 mm	3.0 mm
T1	K1	16.50	17.10	16.30	16.50	17.50	18.00
T2	K1	16.00	16.00	15.80	16.30	16.80	16.40
	K2	22.30	22.50	22.40	22.60	22.50	22.40
	K3	25.60	25.30	25.40	25.60	25.50	25.70
T3	K1	16.20	16.00	15.90	16.80	17.10	16.90
	K2	22.50	22.60	22.80	22.70	22.20	22.10
	K3	25.50	25.50	25.50	25.60	25.80	26.70
T4	K1	16.70	16.20	16.20	17.10	17.30	17.10
	K2	23.20	23.10	23.00	23.50	23.40	23.30
	K3	26.70	26.50	26.30	26.80	26.90	26.10
T5	K1	17.20	16.60	16.10	17.40	17.60	17.20
	K2	23.50	23.40	23.30	23.40	23.50	23.60
	K3	26.80	26.60	26.70	26.70	26.10	26.30
T6	K1	17.60	17.00	16.90	17.60	17.50	17.30
	K2	23.60	23.20	23.10	23.30	23.50	23.80
	K3	26.30	26.90	26.10	26.40	26.70	26.90
T7	K1	18.00	17.10	16.90	17.80	17.60	17.40
	K2	23.80	23.20	23.10	23.80	23.90	24.20
	K3	26.80	26.20	26.10	26.80	27.30	27.80
T8	K1	18.30	17.40	17.10	18.00	17.70	17.60
	K2	23.30	23.10	23.20	23.50	23.40	22.90
	K3	27.30	27.00	27.20	27.50	27.60	28.00
T9	K1	18.90	17.50	17.10	18.10	17.80	17.80
	K2	23.60	23.70	23.50	23.60	23.80	24.00
	K3	27.60	27.20	27.20	27.50	27.40	27.60
T10	K1	18.80	17.50	17.30	18.10	17.90	17.90
	K2	24.00	23.60	23.70	24.20	24.80	24.40
	K3	26.90	26.80	26.90	27.30	27.80	27.70

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.7 ผลการทดลองความเยี่ยงมูมท่อ 4 องศา, ความดัน 2 bar,  $T_{01} = 29 \text{ }^{\circ}\text{C}$

อุณหภูมิ Temp. ( $^{\circ}\text{C}$ )	ตำแหน่ง จุดวัด	ระยะ GAP					
		0.5 mm	1.0 mm	1.5 mm	2.0 mm	2.5 mm	3.0 mm
T1	K1	19.80	20.7	20.00	20.10	18.80	20.20
T2	K1	19.60	19.50	19.70	19.00	19.60	19.80
	K2	24.20	24.10	24.10	24.50	24.60	24.50
	K3	27.30	27.40	27.20	27.50	27.60	28.30
T3	K1	19.60	19.70	19.60	19.30	18.90	19.90
	K2	24.30	24.40	24.20	24.50	24.50	24.30
	K3	27.40	27.60	27.40	27.70	28.20	28.50
T4	K1	20.10	20.20	20.50	20.00	19.20	19.70
	K2	24.30	24.30	24.30	24.50	24.30	24.50
	K3	27.50	27.20	27.00	27.60	27.80	28.20
T5	K1	20.10	20.10	20.20	19.60	19.50	19.90
	K2	24.40	24.20	24.20	24.50	24.70	24.60
	K3	27.60	27.40	27.40	27.80	28.20	28.60
T6	K1	20.00	20.40	20.20	20.10	19.90	20.00
	K2	24.20	24.20	24.30	24.50	24.80	24.80
	K3	27.50	27.40	27.20	27.70	28.30	28.60
T7	K1	20.70	20.50	20.40	20.10	19.80	20.80
	K2	24.60	24.40	24.50	24.70	24.80	24.90
	K3	27.70	27.60	27.50	27.90	28.50	28.60
T8	K1	20.10	20.70	20.30	19.60	20.00	20.10
	K2	24.80	24.50	24.60	24.80	24.90	25.10
	K3	27.80	27.70	27.80	27.90	28.80	29.00
T9	K1	20.50	20.80	20.50	19.90	20.20	20.40
	K2	24.50	24.40	24.50	24.60	24.80	24.70
	K3	28.10	27.60	27.70	28.20	28.80	29.20
T10	K1	20.50	20.40	20.10	19.70	20.60	20.60
	K2	24.80	24.80	24.50	24.60	24.90	25.10
	K3	28.20	28.00	27.90	28.50	28.90	29.10

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.8 ผลการทดลองความเย็งมูมท่อ 4 องศา, ความดัน 2.5 bar,  $T_{01} = 29 \text{ }^{\circ}\text{C}$

อุณหภูมิ Temp. ( $^{\circ}\text{C}$ )	ตำแหน่ง จุดวัด	ระยะ GAP					
		0.5 mm	1.0 mm	1.5 mm	2.0 mm	2.5 mm	3.0 mm
T1	K1	18.90	19.40	18.70	18.40	18.10	19.50
T2	K1	18.90	18.80	18.60	18.70	18.70	18.90
	K2	23.50	23.60	23.40	23.50	23.60	23.10
	K3	26.90	26.70	26.80	27.20	27.60	27.70
T3	K1	18.90	19.00	18.90	18.60	17.60	19.40
	K2	23.10	23.30	23.10	23.40	23.80	23.40
	K3	27.10	26.80	26.70	26.90	27.30	27.50
T4	K1	19.90	19.40	19.70	19.10	18.80	19.00
	K2	23.70	23.80	23.50	23.80	23.40	23.30
	K3	27.50	27.30	27.10	27.60	27.80	28.10
T5	K1	19.10	19.40	19.40	18.90	19.10	19.30
	K2	23.90	13.50	23.40	23.60	23.80	24.00
	K3	27.60	27.30	27.50	27.80	28.10	28.20
T6	K1	19.20	19.70	19.80	19.60	19.20	19.40
	K2	24.00	23.50	23.60	23.70	23.80	23.90
	K3	27.50	27.40	27.30	27.80	27.70	28.20
T7	K1	19.30	20.10	19.70	19.10	19.20	19.50
	K2	23.60	23.50	23.50	23.50	23.70	23.40
	K3	27.70	27.80	27.50	27.80	28.30	28.80
T8	K1	19.60	20.10	19.80	19.20	19.70	19.50
	K2	23.90	23.80	23.90	23.30	23.80	23.60
	K3	27.90	27.80	27.90	28.30	28.50	28.60
T9	K1	19.90	20.20	20.10	19.30	18.90	19.90
	K2	24.60	24.50	24.40	24.60	24.50	24.70
	K3	28.20	27.80	27.90	28.50	28.80	29.10
T10	K1	20.10	19.90	19.60	19.60	20.40	20.40
	K2	24.50	24.80	24.50	24.60	24.40	24.30
	K3	28.40	28.10	28.30	28.50	29.10	29.00

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.9 ผลการทดลองความเยี่ยงนมที่ 4 องศา, ความดัน 3.0 bar,  $T_{01} = 29^{\circ}C$

อุณหภูมิ Temp. ( $^{\circ}C$ )	ตำแหน่ง จุดวัด	ระยะ GAP					
		0.5 mm	1.0 mm	1.5 mm	2.0 mm	2.5 mm	3.0 mm
T1	K1	17.80	18.20	18.10	17.00	17.30	18.70
T2	K1	18.30	17.50	18.20	17.10	17.60	17.90
	K2	23.20	23.10	23.40	23.60	23.40	23.70
	K3	26.80	26.40	26.50	26.40	26.70	27.00
T3	K1	18.30	18.00	18.00	17.50	17.50	18.30
	K2	23.80	23.40	23.70	23.70	23.50	23.80
	K3	26.60	26.50	26.70	26.70	26.80	26.90
T4	K1	18.00	18.30	18.90	18.10	17.80	18.10
	K2	24.00	23.50	23.60	24.20	24.50	24.80
	K3	26.80	26.50	26.40	26.80	27.20	27.50
T5	K1	18.20	18.70	18.60	18.20	18.30	18.40
	K2	23.60	23.70	23.80	23.50	23.60	23.70
	K3	26.80	26.60	26.40	26.80	27.20	27.40
T6	K1	18.40	19.00	19.20	18.90	18.10	18.70
	K2	25.00	24.50	24.30	25.20	25.10	25.10
	K3	27.10	27.00	26.80	27.20	27.40	27.50
T7	K1	18.90	19.40	19.10	18.50	18.60	18.80
	K2	23.00	22.80	22.80	23.10	23.50	23.40
	K3	27.30	26.80	26.90	27.50	27.60	27.80
T8	K1	19.00	19.50	19.00	18.70	19.20	19.00
	K2	24.10	23.60	23.50	23.70	23.60	23.50
	K3	27.50	27.10	27.10	27.00	27.20	27.80
T9	K1	19.20	20.10	19.40	18.70	18.20	19.50
	K2	24.10	24.10	23.90	24.30	24.20	24.30
	K3	27.50	27.20	27.20	27.60	27.90	28.20
T10	K1	19.40	19.60	19.40	19.60	20.10	19.70
	K2	23.80	23.50	23.60	23.80	23.90	24.00
	K3	27.70	27.50	27.40	27.70	28.20	28.50

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.10 ผลการทดลองความเยี่ยงมูมที่ 4 องศา, ความดัน 3.5 bar,  $T_{01} = 29 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 

อุณหภูมิ Temp. ( $^{\circ}\text{C}$ )	ตำแหน่ง จุดวัด	ระยะ GAP					
		0.5 mm	1.0 mm	1.5 mm	2.0 mm	2.5 mm	3.0 mm
T1	K1	16.90	16.40	16.50	16.10	16.20	16.10
T2	K1	16.60	16.10	16.40	15.10	16.10	17.20
	K2	23.30	23.20	23.10	23.50	23.40	23.30
	K3	26.30	26.00	26.10	26.40	26.50	26.60
T3	K1	16.60	16.30	17.10	15.50	16.10	16.90
	K2	22.50	22.50	22.40	22.30	22.60	22.60
	K3	26.40	26.10	26.20	26.50	26.40	26.60
T4	K1	17.30	17.00	17.80	16.10	16.80	17.10
	K2	23.40	23.10	23.10	22.90	22.80	23.40
	K3	26.60	26.20	26.10	26.50	26.60	26.80
T5	K1	17.40	17.50	18.00	16.30	17.70	17.90
	K2	22.40	22.80	23.10	23.50	23.40	23.60
	K3	26.50	26.10	26.00	26.40	26.50	26.40
T6	K1	17.40	18.00	18.10	16.50	17.40	17.60
	K2	22.50	22.80	23.40	23.80	23.70	23.50
	K3	26.70	26.50	26.40	26.70	27.20	27.30
T7	K1	17.50	18.20	17.80	18.30	18.40	18.30
	K2	23.40	23.50	23.10	23.50	23.60	23.40
	K3	27.00	26.80	26.80	27.30	27.50	27.70
T8	K1	18.70	18.90	18.30	18.40	19.00	18.40
	K2	23.20	23.10	23.00	23.50	23.40	23.20
	K3	27.30	27.20	27.10	27.50	27.60	28.10
T9	K1	18.50	19.60	18.70	19.00	19.10	18.50
	K2	23.00	23.40	23.50	23.60	23.50	23.60
	K3	27.50	27.30	27.10	27.60	28.30	28.60
T10	K1	18.40	19.70	18.90	19.30	19.60	18.50
	K2	23.40	23.10	23.20	23.50	23.60	23.50
	K3	27.60	27.40	27.30	27.80	28.50	28.90

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.11 ผลการทดลองความเย็งมุมท่อ 4 องศา, ความดัน 4.0 bar,  $T_{01} = 29 \text{ }^{\circ}\text{C}$

อุณหภูมิ Temp. ( $^{\circ}\text{C}$ )	ตำแหน่ง จุดวัด	ระยะ GAP					
		0.5 mm	1.0 mm	1.5 mm	2.0 mm	2.5 mm	3.0 mm
T1	K1	15.80	15.10	15.80	15.40	15.80	15.70
T2	K1	15.40	14.80	15.80	14.50	15.50	15.40
	K2	20.50	19.90	19.70	20.50	20.80	20.60
	K3	26.40	26.30	26.50	26.60	26.90	27.10
T3	K1	14.80	15.00	15.10	14.50	15.40	14.70
	K2	19.90	19.60	20.40	20.60	20.80	21.10
	K3	26.60	26.20	26.40	26.40	26.50	26.80
T4	K1	15.80	15.60	15.90	14.80	16.30	15.40
	K2	21.50	20.60	19.90	20.50	20.80	21.20
	K3	26.50	26.40	26.50	26.80	26.90	27.00
T5	K1	16.20	16.30	16.40	15.60	17.40	15.50
	K2	21.20	21.50	21.30	21.50	22.10	21.80
	K3	26.80	26.50	26.60	26.80	27.10	27.10
T6	K1	16.60	16.80	16.60	16.60	17.30	16.20
	K2	22.50	22.40	22.60	22.60	22.50	22.70
	K3	27.00	26.80	26.90	27.30	27.60	27.50
T7	K1	17.10	17.20	16.90	16.80	18.10	16.50
	K2	22.50	22.40	22.80	22.80	23.10	23.20
	K3	26.90	26.60	26.60	27.00	27.30	27.80
T8	K1	18.10	17.70	17.40	17.60	18.30	17.10
	K2	23.10	22.90	22.80	22.70	22.90	23.20
	K3	27.30	27.20	27.50	27.60	27.80	28.10
T9	K1	18.10	17.90	17.40	18.40	18.60	17.60
	K2	22.90	23.10	23.00	23.50	23.40	23.60
	K3	27.80	27.60	27.50	27.80	27.90	28.30
T10	K1	17.60	17.80	18.20	17.80	18.60	18.20
	K2	23.50	23.40	23.60	23.80	24.10	24.20
	K3	28.20	28.00	28.10	28.50	28.60	28.80

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.12 ผลการทดลองความเยี่ยงมูมท่อ 4 องศา, ความดัน 4.5 bar,  $T_{01} = 29 \text{ }^{\circ}\text{C}$

อุณหภูมิ Temp. ( $^{\circ}\text{C}$ )	ตำแหน่ง จุดวัด	ระยะ GAP					
		0.5 mm	1.0 mm	1.5 mm	2.0 mm	2.5 mm	3.0 mm
T1	K1	15.00	14.80	14.80	14.50	14.60	14.60
T2	K1	14.50	14.40	14.50	13.60	14.50	14.50
	K2	20.5	20.00	20.30	20.60	21.50	21.60
	K3	26.00	25.70	25.90	26.30	26.50	26.60
T3	K1	14.70	14.50	14.40	14.20	14.40	14.50
	K2	22.30	22.50	22.60	22.80	22.80	22.70
	K3	26.80	26.50	26.40	26.80	26.90	27.30
T4	K1	15.20	15.10	14.70	14.30	15.50	14.70
	K2	20.50	20.50	20.60	20.50	21.50	21.30
	K3	26.70	26.50	26.50	26.80	26.80	27.50
T5	K1	15.30	15.30	15.20	14.70	16.10	15.20
	K2	22.10	22.60	22.50	22.30	22.40	22.50
	K3	26.80	26.40	26.50	26.60	26.90	27.30
T6	K1	16.00	15.80	16.10	15.40	16.70	15.70
	K2	23.10	22.50	22.80	23.40	23.80	24.20
	K3	27.30	27.00	26.80	27.20	27.40	27.60
T7	K1	16.40	16.50	16.30	16.10	17.20	16.00
	K2	23.50	23.50	23.40	23.60	23.50	24.10
	K3	27.20	27.10	26.90	27.30	27.50	27.60
T8	K1	17.40	17.10	16.80	16.20	17.50	16.80
	K2	23.10	22.80	22.70	23.50	23.60	23.80
	K3	27.40	27.00	27.00	27.30	27.90	28.30
T9	K1	17.60	17.50	17.20	16.80	18.00	17.40
	K2	23.50	23.40	23.60	23.80	24.10	24.20
	K3	27.60	27.30	27.50	27.90	28.50	28.80
T10	K1	17.80	17.70	17.30	17.30	18.30	17.70
	K2	23.50	23.60	23.50	23.90	24.80	24.60
	K3	28.20	27.60	28.00	27.90	28.30	28.80

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.13 ผลการทดลองความเยี่ยงมูมท่อ 6 องศา, ความดัน 2 bar,  $T_{o1} = 29 \text{ }^{\circ}\text{C}$

อุณหภูมิ Temp. ( $^{\circ}\text{C}$ )	ตำแหน่ง จุดวัด	ระยะ GAP					
		0.5 mm	1.0 mm	1.5 mm	2.0 mm	2.5 mm	3.0 mm
T1	K1	19.70	20.30	20.00	19.60	19.10	17.50
T2	K1	19.50	19.90	19.80	19.30	18.00	16.30
	K2	23.20	23.00	23.50	23.40	23.60	23.50
	K3	27.20	26.80	26.60	26.40	26.80	27.10
T3	K1	19.80	19.70	19.40	19.20	18.80	16.70
	K2	23.40	23.50	23.60	23.50	23.40	23.50
	K3	27.30	27.20	26.90	27.20	27.30	27.10
T4	K1	19.90	19.60	19.80	19.60	18.20	17.50
	K2	23.50	23.10	23.50	23.80	23.90	23.40
	K3	27.60	27.30	27.20	27.70	28.10	28.30
T5	K1	19.60	20.10	20.00	19.00	20.20	17.90
	K2	23.80	23.50	23.40	23.80	23.90	23.90
	K3	27.80	27.40	27.30	27.50	27.90	28.10
T6	K1	20.10	20.20	20.30	19.00	20.10	18.40
	K2	24.00	23.80	23.60	24.30	24.80	24.40
	K3	28.20	27.60	27.60	27.80	28.10	28.20
T7	K1	20.00	20.20	20.00	19.10	20.20	19.40
	K2	23.80	23.80	23.70	23.60	23.10	23.50
	K3	28.00	27.50	27.60	27.70	28.20	28.20
T8	K1	20.00	20.30	20.20	19.40	19.60	20.30
	K2	23.90	24.00	23.50	23.80	24.20	24.40
	K3	27.80	27.50	27.80	28.20	28.40	28.50
T9	K1	20.10	20.40	19.60	19.30	20.20	20.60
	K2	23.80	23.90	23.80	23.50	23.70	24.00
	K3	27.90	27.80	27.90	28.30	28.20	28.40
T10	K1	20.30	20.60	20.30	19.30	20.90	20.80
	K2	23.50	23.60	23.70	23.50	23.90	23.50
	K3	28.20	27.80	27.90	28.10	28.50	28.90

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.14 ผลการทดลองความเยี่ยงมูมที่ 6 องศา, ความดัน 2.5 bar,  $T_{0i} = 29^{\circ}\text{C}$

อุณหภูมิ Temp. ( $^{\circ}\text{C}$ )	ตำแหน่ง จุดวัด	ระยะ GAP					
		0.5 mm	1.0 mm	1.5 mm	2.0 mm	2.5 mm	3.0 mm
T1	K1	19.20	18.60	18.40	18.40	16.70	15.50
T2	K1	18.80	18.20	17.60	16.70	15.90	14.80
	K2	22.50	22.60	22.40	22.50	22.30	22.80
	K3	27.30	27.00	27.20	27.50	27.40	27.60
T3	K1	19.10	18.60	17.90	17.20	16.20	15.20
	K2	22.50	22.50	22.40	22.50	22.80	22.80
	K3	27.20	26.80	26.70	26.60	26.50	26.90
T4	K1	19.20	18.80	18.00	17.50	16.60	15.80
	K2	23.50	22.50	22.80	23.40	23.80	23.70
	K3	27.10	26.80	26.80	26.90	27.30	27.20
T5	K1	18.60	19.60	19.60	18.50	18.30	16.70
	K2	23.80	23.50	23.60	23.40	24.70	24.60
	K3	27.40	27.50	27.30	27.60	27.80	28.10
T6	K1	19.30	20.10	19.50	18.60	18.30	17.90
	K2	24.50	23.30	22.10	22.50	23.70	23.80
	K3	27.60	27.40	27.30	27.20	27.60	27.90
T7	K1	19.00	19.80	19.60	18.20	18.40	19.10
	K2	23.40	25.60	24.50	24.30	25.30	26.30
	K3	27.40	27.50	27.50	27.80	27.90	28.30
T8	K1	19.20	19.70	19.80	18.60	18.50	19.30
	K2	23.30	23.40	23.50	24.20	24.10	25.50
	K3	27.60	27.10	27.10	27.60	27.80	28.40
T9	K1	19.60	19.80	19.80	19.50	18.80	19.70
	K2	24.50	24.00	24.10	25.60	25.40	25.20
	K3	28.10	27.80	27.60	27.80	28.20	28.80
T10	K1	19.50	20.00	20.60	19.20	20.00	20.50
	K2	24.60	24.50	24.30	24.80	25.60	25.70
	K3	23.80	28.00	28.10	28.50	28.90	29.20

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.15 ผลการทดลองความเยี่ยงมูมท่อ 6 องศา, ความดัน 3.0 bar,  $T_{o1} = 29 \text{ }^{\circ}\text{C}$

อุณหภูมิ Temp. ( $^{\circ}\text{C}$ )	ตำแหน่ง จุดวัด	ระยะ GAP					
		0.5 mm	1.0 mm	1.5 mm	2.0 mm	2.5 mm	3.0 mm
T1	K1	18.10	18.30	18.50	18.30	16.00	14.50
T2	K1	17.60	17.60	17.60	17.40	15.30	15.20
	K2	22.50	21.30	21.80	22.90	23.40	22.80
	K3	26.40	26.30	26.40	26.50	26.70	26.80
T3	K1	17.90	18.00	18.00	17.40	15.80	15.10
	K2	21.50	21.50	21.90	22.30	22.50	22.70
	K3	26.70	26.40	26.40	26.60	26.70	26.70
T4	K1	18.40	18.10	17.70	19.70	16.60	15.80
	K2	22.40	22.80	22.40	22.60	22.90	23.10
	K3	26.60	26.60	26.60	26.80	26.90	27.10
T5	K1	18.30	19.00	18.10	17.60	16.50	16.40
	K2	23.50	23.10	23.80	24.10	23.90	24.50
	K3	26.70	26.80	26.40	26.60	26.90	27.30
T6	K1	18.70	19.40	18.80	17.80	17.10	17.90
	K2	23.80	23.50	22.80	22.90	23.50	23.20
	K3	27.20	26.80	26.50	26.30	27.00	27.10
T7	K1	18.50	18.90	18.90	17.60	17.50	18.10
	K2	24.20	23.80	24.30	24.80	24.60	24.30
	K3	27.00	26.90	26.70	26.80	26.90	27.00
T8	K1	18.60	19.30	19.10	17.70	17.80	18.30
	K2	23.60	23.50	23.40	23.80	23.80	23.80
	K3	27.30	26.90	27.10	27.50	27.80	28.30
T9	K1	19.30	19.20	19.20	19.00	18.80	18.00
	K2	23.40	23.50	23.50	23.80	24.10	23.90
	K3	27.30	26.80	26.90	26.70	27.40	27.80
T10	K1	19.30	19.70	19.90	19.40	19.20	19.10
	K2	24.00	23.80	23.70	23.80	23.90	24.00
	K3	27.60	27.50	27.80	27.90	28.40	28.70

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.16 ผลการทดลองความเยี่ยงมูมท่อ 6 องศา, ความดัน 3.5 bar,  $T_{01} = 29 \text{ }^{\circ}\text{C}$

อุณหภูมิ Temp. ( $^{\circ}\text{C}$ )	ตำแหน่ง จุดวัด	ระยะ GAP					
		0.5 mm	1.0 mm	1.5 mm	2.0 mm	2.5 mm	3.0 mm
T1	K1	15.8	17.9	18.1	17	14.9	13.2
T2	K1	15.5	16.5	16.7	16.2	13.7	11
	K2	21.3	20.5	22.1	21.9	22.5	23.2
	K3	26.3	26.1	26.4	26.7	26.5	26.4
T3	K1	15.9	16.6	16.4	16.2	15.2	12.4
	K2	21.1	21	22.1	22.5	22.7	21.5
	K3	26.5	26.5	26.5	26.7	26.8	26.9
T4	K1	16.2	16.5	16.2	16	15.2	13
	K2	22.3	21.5	21.4	20.9	21.8	22.1
	K3	26.4	26.1	26.3	26.5	26.9	27.1
T5	K1	16.5	17.5	17.5	16.5	15.7	13.3
	K2	22.5	22.8	22.9	22.5	22.4	22.6
	K3	26.8	26.5	26.7	26.8	26.9	27.2
T6	K1	16.8	18.3	18.1	16.7	15.4	15.8
	K2	22.8	22.5	22.6	22.4	22.9	23.2
	K3	27.2	27	27.3	27.5	27.4	27.8
T7	K1	16.9	18.5	18.4	16.9	16.9	16.5
	K2	22.5	22.5	22.6	22.4	22.3	22.2
	K3	27	26.9	26.8	27.3	27.5	27.8
T8	K1	16.2	18.6	19	16.3	17.2	16.5
	K2	21.9	22.5	22.4	22.6	22.8	22.7
	K3	27.4	27.1	27.3	27.8	28.3	28.6
T9	K1	16.4	19.2	19.1	18.3	18.1	16.5
	K2	22.8	22.5	21.5	21.8	22.9	22.4
	K3	27.8	27.7	27.8	28.3	28.8	29.3
T10	K1	16.1	18.3	20	19.3	18.8	16.7
	K2	22.5	22.6	22.5	22.7	22.5	22.4
	K3	27.6	27.5	27.6	27.9	28.9	29.5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.17 ผลการทดลองความเอียงมุมท่อ 6 องศา, ความดัน 4.0 bar,  $T_{01} = 29 \text{ }^{\circ}\text{C}$

อุณหภูมิ Temp. ( $^{\circ}\text{C}$ )	ตำแหน่ง จุดวัด	ระยะ GAP					
		0.5 mm	1.0 mm	1.5 mm	2.0 mm	2.5 mm	3.0 mm
T1	K1	15.2	16.7	16.3	16.7	12.6	10.5
T2	K1	14.3	15.4	15.3	14.8	12	9.9
	K2	20.3	20.4	19.8	20.3	19.6	18.5
	K3	25.4	24.9	24.8	25.2	25.6	25.8
T3	K1	15.3	15.5	15.7	15.4	13.4	11.9
	K2	20.6	19.8	19.2	19.4	18.5	17.9
	K3	25.6	25.3	25.6	25.8	25.9	25.6
T4	K1	15.4	15.5	15.2	14.8	13.5	12.2
	K2	21.1	20.8	20.2	19.4	19.1	17.5
	K3	26.2	25.8	25.9	26.4	26.7	26.8
T5	K1	15.2	16.4	14.8	15.3	14	12.7
	K2	22.2	21.8	20.6	20.9	19.8	18.6
	K3	26.4	26.2	26.5	26.8	27.1	27.3
T6	K1	16	17.3	16.7	15.5	14.5	14.5
	K2	22.5	22.7	22.2	22.3	20.5	18.7
	K3	26.8	26.5	26.4	26.8	26.9	27.4
T7	K1	16.1	17.6	17.2	16.2	15.7	15.8
	K2	22.8	22.6	22.1	22	21.5	20.9
	K3	27.3	27.5	27.4	27.6	28.2	28.1
T8	K1	15.6	17.9	18.2	15.8	16.4	15.5
	K2	23.3	22.7	22.9	21.8	21.7	21.4
	K3	27.2	26.8	27.9	27.2	27.5	27.9
T9	K1	16.2	18.6	18.1	17.1	18	15.7
	K2	21.5	21.6	21.8	20.5	21.5	22.2
	K3	27.6	27.4	27.7	27.8	28.1	28.5
T10	K1	16.4	19.2	18.7	18.8	17.9	16.4
	K2	22.5	22.4	21.9	22.5	22.7	22.1
	K3	27.8	27.5	27.6	28	28.4	28.9

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.18 ผลการทดลองความเย็งมูมที่ 6 องศา, ความดัน 4.5 bar,  $T_{01} = 29^{\circ}\text{C}$

อุณหภูมิ Temp. ( $^{\circ}\text{C}$ )	ตำแหน่ง จุดวัด	ระยะ GAP					
		0.5 mm	1.0 mm	1.5 mm	2.0 mm	2.5 mm	3.0 mm
T1	K1	13.3	15.8	16	14.5	11.8	10.1
T2	K1	12.8	14.6	14.9	13.6	10.6	9.3
	K2	19.9	20.5	20.6	21	21.7	22.2
	K3	24.4	23.7	23.8	24.2	25.5	24.9
T3	K1	13.5	14.8	15.2	13.7	11.8	10.1
	K2	18.8	19.2	18.9	20.5	21.4	22.4
	K3	23.8	24.2	24.4	24.3	24.8	25.2
T4	K1	13.6	15.1	14.6	13	11.8	11.1
	K2	19.2	19.6	19.4	20.4	21.5	21.6
	K3	24.4	24.3	24.2	24.5	25	25.2
T5	K1	13.8	15.7	14.3	14	12.4	12
	K2	20.3	21.5	21.1	22.2	23.3	22.8
	K3	24.7	24.4	24.6	24.8	25	25.5
T6	K1	14.8	16.7	16.4	14.5	13.6	13.7
	K2	22.5	20.1	20.6	20.5	19.8	21.4
	K3	25.2	24.8	24.5	24.3	25.5	25.9
T7	K1	14.1	17.1	17.2	14.7	14.6	14.7
	K2	20.5	20.6	20.5	18.6	18.9	19.4
	K3	25.6	25.2	25	25.8	26.1	26.4
T8	K1	15	17.7	17.9	15.9	15.5	14.4
	K2	22.3	22.5	21.8	22.5	22.4	23.2
	K3	26.2	26.3	26.5	25.7	25.9	26.5
T9	K1	15.2	18.4	18.1	16.8	16.5	14.9
	K2	22.5	20.5	20.8	23.2	22.8	23.5
	K3	26.5	26.7	27.2	27.1	27.8	28.2
T10	K1	15.5	18.6	18.8	18.3	17.4	16.2
	K2	22.5	23.0	22.8	22.9	22.5	22.6
	K3	27.2	27.1	27.5	28.1	28.5	29

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ประวัติผู้เขียน

นายปริญญา ปริญญาพงศ์ เกิดวันที่ 20 สิงหาคม 2508 ที่จังหวัดกาญจนบุรี สำเร็จ  
การศึกษาปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาฟิสิกส์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ วิทยา  
เขตพิษณุโลก (มหาวิทยาลัยนเรศวร) ปี พ.ศ. 2531



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้