

การศึกษาเครื่องยนต์ที่มีอากาศัดเป็นต้นกำลัง



นายภูพิงค์ แต่ปีติกุล

ศูนย์วิทยทรัพยากร

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

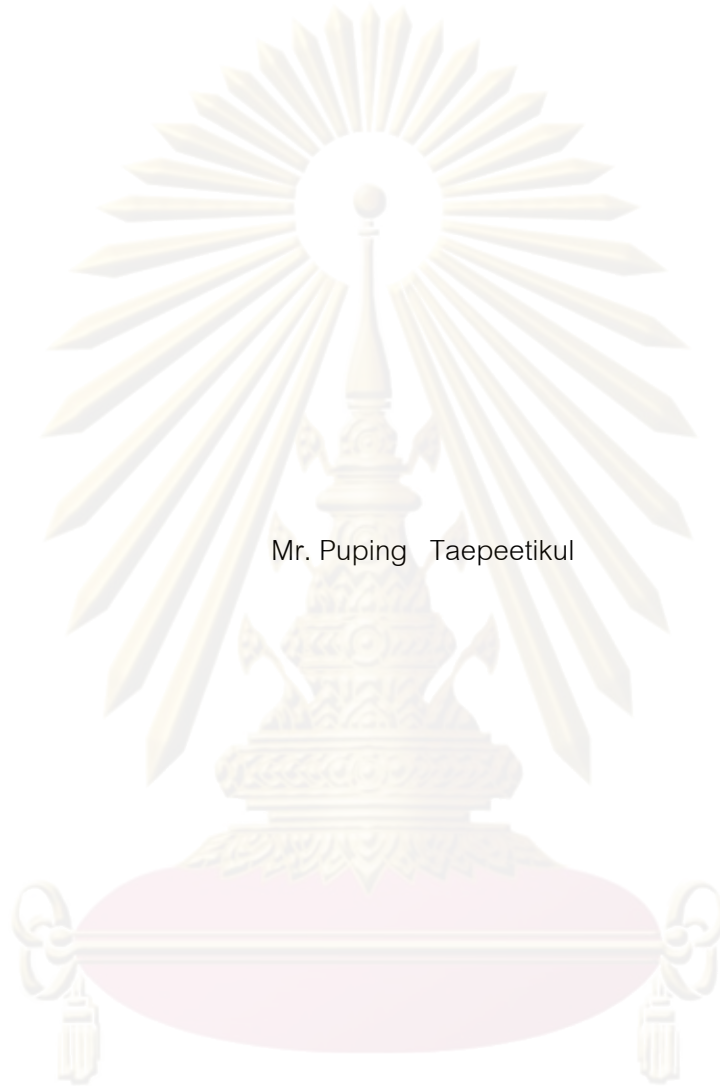
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2552

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

A STUDY OF THE COMPRESSED AIR ENGINE



Mr. Puping Taepeetikul

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering Program in Mechanical Engineering

Department of Mechanical Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2009

Copyright of Chulalongkorn University

ภูพิงส์ แต่ปีติกุล : การศึกษาเครื่องยนต์ที่มีอากาศอัดเป็นต้นกำลัง

(A STUDY OF THE COMPRESSED AIR ENGINE)

อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก : รศ.ดร. วิทยา ขงเจริญ, 141 หน้า.

การแปรเปลี่ยนพลังงานเป็นกำลังงานทางกลจำเป็นต้องอาศัยเครื่องยนต์ โดยปัจจุบันเครื่องยนต์ที่มีประสิทธิภาพและได้รับความนิยมอย่างกว้างขวางได้แก่เครื่องยนต์ที่อาศัยการสันดาปภายใน จากการแปรเปลี่ยนพลังงานเคมีของเชื้อเพลิงปิโตรเลียม ในปัจจุบันเป็นที่ยอมรับกันโดยทั่วไปว่าเครื่องยนต์ที่อาศัยการสันดาปได้ก่อให้เกิดมลพิษทางอากาศ และปัญหาสิ่งแวดล้อมมากมาย ในขณะที่เดียวกันเชื้อเพลิงก็มีอยู่อย่างจำกัด ซึ่งเป็นแรงขับเคลื่อนในการคิดค้นต้นกำลังชนิดใหม่ที่อาศัยพลังงานจากแหล่งพลังงานที่ได้จากอนุพันธ์ทางพลังงานของดวงอาทิตย์ หนึ่งในแนวคิดการใช้พลังงานจากดวงอาทิตย์คือการแปรเปลี่ยนพลังงานโดยเครื่องยนต์ที่ใช้อากาศความดันสูงเป็นต้นกำลัง ซึ่งสามารถใช้ในระบบสำรองพลังงานและประยุกต์ใช้ในยานพาหนะส่วนบุคคลได้ โดยการบีบอัดอากาศให้มีความดันสูงและผ่านอากาศที่มีความดันสูง นี้สู่เครื่องยนต์ที่ประกอบด้วยอุปกรณ์ขยายตัวแบบ 2 ชั้น คือขั้นสูงและขั้นต่ำ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพทางอุณหพลศาสตร์ให้สูงขึ้น และกำลังงานทางกลที่มากกว่าการขยายตัวแบบ 1 ชั้น โดยอากาศความดันสูงจะผ่านขบวนการ Throttling โดย Pressure regulator .ให้อยู่ในระดับ 35-20 บรรยากาศ ก่อนไหลเข้าสู่ระบบ ซึ่งประกอบไปด้วยอุปกรณ์ขยายตัว 2 ชุดเป็นแบบ Sliding vane จำนวน 5 ใบ และปริมาตรภายในสำหรับขั้นสูง 12.5 cc สำหรับขั้นต่ำ 60 cc ขบวนการศึกษาประกอบด้วย 2 ส่วน คือการออกแบบอุปกรณ์ระบบและทำการทดลองกับเครื่องต้นแบบที่ได้สร้างขึ้น จากผลการทดลองอากาศความดัน 30 บรรยากาศ อุณหภูมิห้อง จ่ายให้กับเครื่องยนต์ จะได้กำลังสูงสุดรวมประมาณ 752 วัตต์ โดยอุปกรณ์ขยายตัวขั้นสูงจะได้กำลังงาน 252 วัตต์ ที่ความเร็วรอบ 1925 รอบต่อนาที ,แรงบิด 1.25 นิวตันเมตร สำหรับอุปกรณ์ขยายตัวขั้นต่ำ จะได้กำลังงาน 500 วัตต์ที่ความเร็วรอบ 1475 รอบต่อนาที แรงบิด 3.24 นิวตันเมตร จากผลการทดลองประสิทธิภาพทางกลของระบบโดยรวมสำหรับเครื่องยนต์ต้นแบบยังคงมีค่ามากเมื่อเทียบกับทางทฤษฎี

ภาควิชา วิศวกรรมเครื่องกล ลายมือชื่อนิสิต ภูพิงส์ 2552/20
สาขาวิชา วิศวกรรมเครื่องกล ลายมือชื่ออ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก end
ปีการศึกษา 2552

4870689821 : MAJOR MECHANICAL ENGINEERING

KEYWORDS : HIGH STATE EXPANDER/ LOW STATE EXPANDER/COMPRESSED AIR /ENGINE

PUPING TAEPEETIKUL : A STUDY OF THE COMPRESSED AIR ENGINE.

THESIS ADVISOR : ASSOC. PROF. WITHAYA YONGCHAREON, 141 pp.

The energy transform to the mechanical power is established from engine. Recently, the most popular and high efficiency engine is internal combustion engine that transforms chemical energy as petroleum fuel. Now, the worlds know that the internal combustion engine is the main cause of pollution problem and many problems in our environment. From limited energy of petroleum fuel that inspired to innovate any new prime movers, the energy directly transforms from solar differential energy. One ideal of the other is the energy transform from compressed air engine that uses to storage energy and applies to use in small vehicle. The prototype engine that consists of high pressure state expander and low pressure state expander for increasing thermodynamic efficiency and more mechanical power from single state expansion. Firstly, high pressure air flows to the pressure regulator for pressure throttling that reduces pressure approximately 35- 20 bar, before flows to the system. The system composes two sliding vane expanders; another has five sliding vanes. Volume of high pressure state expander is 12.5 cc and volume of low pressure state expander is 60 cc .the study process is separated into two sections, design and assembly prototype is the first section and experimental section is basic characteristic education. From experimental data ,the highest total power is 752 watts when the inlet pressure is 30 bar and ambient temperature of nitrogen to the engine. The total power is the sum of high pressure state expnsion giving 252 watts at 1925 rpm, 1.25 N.m in torque and low pressure state expansion giving 500 watts at 1475 rpm,3.24 N.m in torque. In conclusion, the mechanical efficiency of prototype engine is very low compares to the theoretical isothermal efficiency.

Department:.....Mechanical Engineering..... Student's Signature *Puping Taepeetikul*

Field of Study:.....Mechanical Engineering..... Advisor's Signature *Withaya Yongchareon*

Academic Year:.....2009.....

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยความช่วยเหลืออย่างยิ่ง ของรองศาสตราจารย์ ดร. วิทยา ขงเจริญ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ให้ความกรุณาช่วยเหลือและให้คำปรึกษาต่างๆ ทำให้วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ตลอดจนสถาบันวิจัยพลังงานแห่งจุฬาลงกรณ์ที่ได้มอบทุนสนับสนุนการวิจัยบางส่วนและขอขอบคุณเพื่อนนิสิตในระดับปริญญาโทที่ให้คำปรึกษา และความช่วยเหลือในการทำวิทยานิพนธ์

ท้ายสุดนี้ขอขอบพระคุณบิดา มารดา ครูช่าง และเพื่อนๆทุกคนที่เป็นกำลังใจ ทำให้ข้าพเจ้าสามารถศึกษาต่อระดับปริญญาโทได้สำเร็จลุล่วง



ศูนย์วิทยุทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

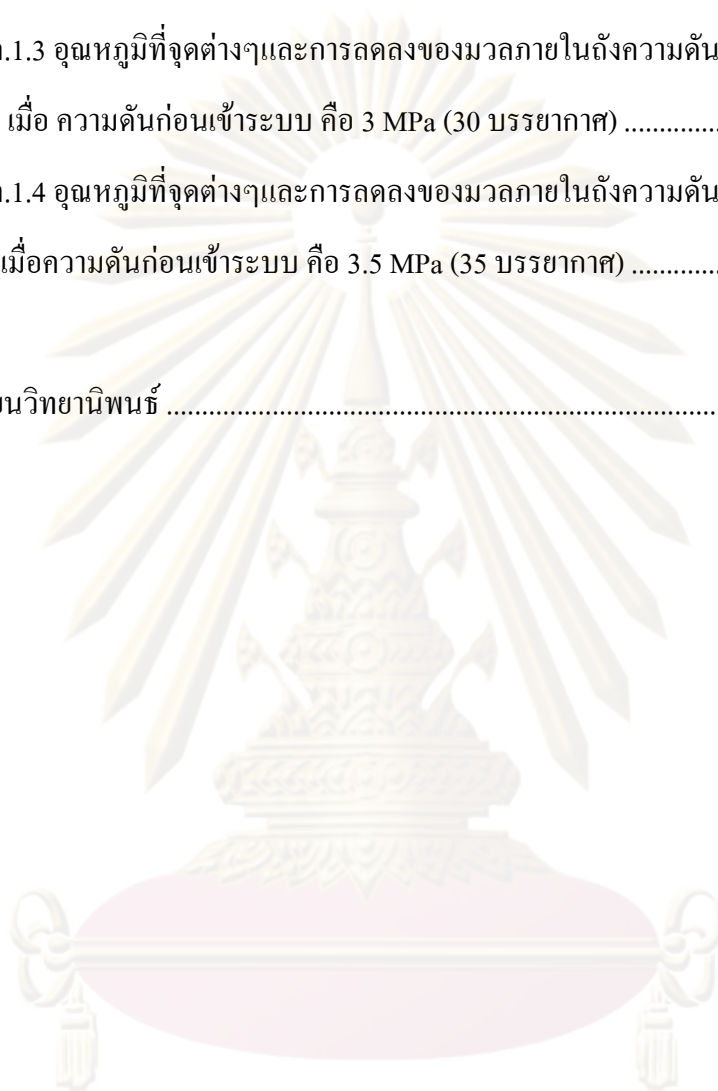
หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฅ
ตารางภาพ	ฉ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์.....	5
1.3 วิธีการดำเนินงาน	6
1.4 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์	6
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	6
1.6 เนื้อหาในวิทยานิพนธ์	6
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	8
2.1 ประวัติของเครื่องยนต์ที่ใช้อากาศอัดเป็นต้นกำลัง.....	8
2.2 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวกับการใช้พลังงานจากการขยายตัวของก๊าซ	10
2.3 แนวทางในการทำวิจัย.....	12
บทที่ 3 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	12
3.1 ทฤษฎีเบื้องต้นทางอุณหพลศาสตร์เพื่อวิเคราะห์การอัดและขยายตัวของอากาศ	12
3.1.1 กฎการอนุรักษ์มวลของปริมาตรควบคุม.....	12
3.1.2 กฎข้อที่หนึ่งของอุณหพลศาสตร์สำหรับปริมาตรควบคุม	13
3.1.3 กฎข้อที่สองของอุณหพลศาสตร์สำหรับปริมาตรควบคุม.....	14

3.1.4	กำลังงานของไหลในสภาวะอยู่ตัวการไหล.....	16
3.1.5	งานจากขบวนการขยายตัวของอากาศ(สารอัดได้เชิงเดี่ยว)ด้วยขบวนการย้อนกลับได้	16
3.1.6	งานจากขบวนการขยายตัวของอากาศ(สารอัดได้เชิงเดี่ยว)ด้วยขบวนการย้อนกลับได้แบบขยายตัว 2 ชั้น	19
3.2	การวิเคราะห์การขยายตัวของอากาศภายในระบบผ่านใบพัดเลื่อน (Sliding vane) และประสิทธิภาพการขยายตัวของอากาศอัดแบบ 2 ชั้นของเครื่องยนต์ที่ออกแบบ.....	20
3.2.1	ในกรณีการขยายตัวเป็นแบบอุณหภูมิคงที่แบบย้อนกลับได้ (Reversible-Isothermal)	20
3.2.2	ในกรณีการขยายตัวเป็นแบบไม่มีการถ่ายเทความร้อนย้อนกลับได้ (Isentropic).....	20
3.2.3	ในกรณีการขยายตัวเป็นแบบมีการถ่ายเทความร้อนย้อนกลับได้ (Polytropic).....	21
3.2.4	ความเป็นไปได้ของระบบที่ออกแบบ	23
3.3	ทฤษฎีเบื้องต้นของการไหลแบบอัดตัวได้	24
3.3.1	ความเร็วเสียง (Speed of sound).....	24
3.3.2	การไหลผ่านช่องเล็กแบบ Isentropic Process	28
บทที่ 4	การออกแบบเครื่องยนต์ต้นแบบสำหรับการวิจัย	32
4.1	ลำดับแนวคิดและการออกแบบอุปกรณ์ทั้งระบบ	32
4.2	ลักษณะของอุปกรณ์ขยายตัวชนิดต่างๆ	35
4.2.1	แบบใช้ลูกสูบ (Piston air motor)	35
4.2.2	แบบใบพัดเลื่อน (Sliding vane air motor)	37
4.2.3	แบบช่องเฟือง (Gerotor air motor)	39
4.2.4	แบบใบพัด (Turbine air motor)	39
4.3	การออกแบบอุปกรณ์ขยายตัวของก๊าซ.....	40
4.3.1	การวิเคราะห์เชิงปริมาตรของอุปกรณ์ขยายตัว.....	44
4.4	การออกแบบอุปกรณ์วัดกำลังเครื่องยนต์.....	58
บทที่ 5	การสร้างและการติดตั้งอุปกรณ์	60
5.1	ขั้นตอนการประกอบอุปกรณ์.....	60

5.1.1 การประกอบชุดอุปกรณ์ขยายตัวความดันสูง	60
5.1.2 การประกอบชุดอุปกรณ์ขยายตัวความดันต่ำ	65
5.1.3 การประกอบชุดวัดแรงบิด	69
5.1.4 การประกอบชุดวัดความเร็วรอบ	70
5.2 ขั้นตอนการติดตั้งอุปกรณ์	71
5.2.1 การติดตั้งอุปกรณ์ขยายตัวความดันสูงบนฐาน	72
5.2.2 การติดตั้งอุปกรณ์ขยายตัวความดันต่ำบนฐาน	73
5.2.3 การติดตั้งอุปกรณ์การวัดและระบบท่อ	73
บทที่ 6 การเก็บข้อมูลและการวิเคราะห์ผลการทดลอง	75
6.1 ผลการทดลอง	76
6.2 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังงานสูงสุดที่ได้กับความดันที่จ่ายให้แก่เครื่องยนต์	86
6.3 การรั่วไหลภายในและแรงเสียดทานภายในของอุปกรณ์ขยายตัว	86
บทที่ 7 สรุปการวิจัยและข้อเสนอแนะ	89
7.1 สรุปผลการวิจัย	89
7.2 ข้อเสนอแนะ	89
รายการอ้างอิง.....	91
ภาคผนวก.....	93
ภาคผนวก ก. โปรแกรมที่ใช้ในการออกแบบอุปกรณ์และแบบชิ้นส่วน	94
ภาคผนวก ข. อุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย	112
ข.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย	112
ข.2 การใช้โปรแกรมในการบันทึกค่าอุณหภูมิและความดัน	115
ภาคผนวก ค. อุณหภูมิและการลดลงของมวลภายในถึงความดัน	119
ค.1 อุณหภูมิที่จุดต่างๆและการลดลงของมวลภายในถึงความดันของระบบเครื่องยนต์	119
ค.1.1 อุณหภูมิที่จุดต่างๆและการลดลงของมวลภายในถึงความดันของระบบเครื่องยนต์ เมื่อความดันก่อนเข้าระบบ คือ 2 MPa (20 บรรยากาศ)	120

ค.1.2 อุณหภูมิที่จุดต่างๆและการลดลงของมวลภายในถึงความดันของระบบเครื่องยนต์ เมื่อความดันก่อนเข้าระบบ คือ 2.5 MPa (25 บรรยากาศ)	126
ค.1.3 อุณหภูมิที่จุดต่างๆและการลดลงของมวลภายในถึงความดันของระบบเครื่องยนต์ เมื่อ ความดันก่อนเข้าระบบ คือ 3 MPa (30 บรรยากาศ)	131
ค.1.4 อุณหภูมิที่จุดต่างๆและการลดลงของมวลภายในถึงความดันของระบบเครื่องยนต์ เมื่อความดันก่อนเข้าระบบ คือ 3.5 MPa (35 บรรยากาศ)	136
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์	141



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญตาราง

ตาราง 4.1การขยายตัวของของไหลในช่วงใบพัดเลื่อนที่ 2 และ3 ระหว่างมุม A ตั้งแต่ 90-108 องศา ของอุปกรณ์ขยายตัวความดันสูง (2.5 MPa).....	53
ตาราง 4.2การขยายตัวของของไหลในช่วงใบพัดเลื่อนที่ 2 และ3 ระหว่างมุม A ตั้งแต่ 90-108 องศา ของอุปกรณ์ขยายตัวความดันต่ำ (1 MPa)	57
ตาราง 6.1 การเปรียบเทียบการรั่วไหลภายในอุปกรณ์ขยายตัวทั้งสองชั้น.....	87
ตาราง 6.2การเปรียบเทียบกำลังงานไฟฟ้าที่เกิดจากแรงเสียดทานภายในอุปกรณ์ขยายตัวทั้ง สองชั้น.....	88



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางภาพ

รูปที่ 1-1 แผนที่ของการส่งผ่านพลังงานจากต้นกำเนิดถึงแหล่งที่ใช้พลังงานในปัจจุบัน 3

รูปที่ 1-2 แผนที่ของการส่งผ่านพลังงานในช่วงการเปลี่ยนแปลงจากแหล่งพลังงานถึงแหล่งใช้พลังงาน . 4

รูปที่ 1-3 แผนที่ของการส่งผ่านพลังงานจากแหล่งกำเนิดถึงแหล่งที่ใช้พลังงานในอนาคต 5

รูปที่ 2-1 ลักษณะเครื่องยนต์ที่ใช้อากาศอัดเป็นต้นกำลังของ MDI [11] 10

รูปที่ 2-2 แผนผังการขยายตัวของไนโตรเจนเหลว 11

รูปที่ 3-1 แสดงการไหลเข้าและออกของของไหลทำงานผ่านปริมาตรควบคุม 12

รูปที่ 3-2 แสดงการไหลเข้าและออกของของไหลทำงานผ่านปริมาตรควบคุม 13

รูปที่ 3-3 แสดงการไหลเข้าและออกของของไหลทำงานผ่านปริมาตรควบคุมและการเปลี่ยนแปลง
เอนโทรปีตามกฎข้อที่สองของอุณหพลศาสตร์ 15

รูปที่ 3-4 ความสัมพันธ์ระหว่างความดันและปริมาตรจำเพาะของขบวนการขยายตัวเชิงเดี่ยว
(25Bar-1Bar) 22

รูปที่ 3-5 ความสัมพันธ์ระหว่างความดันและปริมาตรจำเพาะของขบวนการขยายตัว 2 ชั้น 22

รูปที่ 3-6 ความสัมพันธ์ระหว่างความดันและปริมาตรจำเพาะของขบวนการขยายตัว 2 ชั้นแบบ
Polytropic {n=1.3} (25Bar-5Bar-1Bar)..... 23

รูปที่ 3-7 สถานะของการไหลปริมาตรควบคุมเคลื่อนไปพร้อมกับคลื่นกระแทก 25

รูปที่ 3-8 การไหลของของไหลที่อัดตัวได้ภายในท่อเล็ก 26

รูปที่ 3-9 การไหลของของไหลที่บีบอัดตัวได้แบบ Isentropic Process ผ่านช่องเล็ก 28

รูปที่ 3-10 ฟังก์ชันที่ใช้ในการควบคุมอัตราการไหลของก๊าซให้คงที่..... 30

รูปที่ 4-1 แผนผังการสร้างอุปกรณ์ที่จำเป็นสำหรับระบบต้นกำลังที่วิจัย 32

รูปที่ 4-2 แผนผังวิธีคิดในการสร้างอุปกรณ์ทั้งระบบ..... 33

รูปที่ 4-3 ลักษณะของมอเตอร์ลมแบบกระบอกสูบเรียงตัวรอบตามแนวรัศมี[17] 36

รูปที่ 4-4 ลักษณะของมอเตอร์ลมแบบกระบอกเรียงตัวตามแนวเพลา [17]..... 37

รูปที่ 4-5 ลักษณะของมอเตอร์ลมแบบใบพัดเลื่อน [17]..... 38

รูปที่ 4-6 ลักษณะของมอเตอร์ลมแบบช่องเฟือง [17] 39

รูปที่ 4-7 ลักษณะของมอเตอร์ลมแบบใบพัด [17]..... 40

รูปที่ 4-8 ลักษณะทางกายภาพและการประกอบห้องใบพัดเลื่อนของ Air Impact wrench ยี่ห้อ
A.C.E.-200 N..... 41

รูปที่ 4-9 ลักษณะทางกายภาพและการประกอบห้องใบพัดเคลื่อนของ Air Impact wrench ยี่ห้อ A.C.E.-4500 S-W	42
รูปที่ 4-10 ลักษณะทางกายภาพและการประกอบชุดอุปกรณ์ขยายตัวความดันสูง	43
รูปที่ 4-11 ลักษณะทางกายภาพและการประกอบชุดอุปกรณ์ขยายตัวความดันต่ำ	43
รูปที่ 4-12 ลักษณะการเชื่อมโยงระบบต่างๆของเครื่องยนต์ที่ใช้อากาศอัดความดันเป็นต้นกำลัง.....	44
รูปที่ 4-13 ลักษณะรูปตัดขวางของอุปกรณ์ขยายตัวความดันสูง	44
รูปที่ 4-14 รูปตัดขวางในช่วง initial zone ของอุปกรณ์ขยายตัวความดันสูง	45
รูปที่ 4-15 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างมุม A มุมB, พื้นที่ที่ใบพัดกวาดและความยาวใบพัดที่เคลื่อนออกมาภายในช่วง initial zone	46
รูปที่ 4-16 รูปตัดขวางในช่วง offset zone ของอุปกรณ์ขยายตัวความดันสูง	46
รูปที่ 4-17 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างมุม A มุมB, พื้นที่ที่ใบพัดกวาดและความยาวใบพัดที่เคลื่อนออกมาภายในช่วง offset zone	47
รูปที่ 4-18 รูปตัดขวางในช่วง expansion zone ของอุปกรณ์ขยายตัวความดันสูง	48
รูปที่ 4-19 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างมุม A มุมB, พื้นที่ที่ใบพัดกวาดและความยาวใบพัดที่เคลื่อนออกมาภายในช่วง expansion zone	49
รูปที่ 4-20 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างมุม A มุมB, พื้นที่ที่ใบพัดกวาดและความยาวใบพัดที่เคลื่อนออกมามาตลอดการหมุนตั้งแต่มุม A เท่ากับ 0 ถึง 180 องศา	49
รูปที่ 4-21 ลักษณะของการกันห้องระหว่างแกนหมุนที่มีใบพัดเคลื่อนทำมุม 72 องศา กับผิวห้องหมุน	50
รูปที่ 4-22 ลักษณะของแรงดันที่กระทำกับใบพัดเคลื่อนทั้งสองใบระหว่างอากาศเข้าและออก.....	50
รูปที่ 4-23 ลักษณะทางกายภาพของใบพัดเคลื่อนทั้งสองที่สร้างแรงบิดให้กับแกนหมุน	51
รูปที่ 4-24 ลักษณะของความไม่สมดุลของแรงดันที่กระทำกับใบพัดเคลื่อนทั้งสองตลอดช่วงการเกิดแรงบิดรอบแกนหมุนตามเข็มนาฬิกา.....	52
รูปที่ 4-25 กราฟแรงบิดที่ได้สูงสุดของอุปกรณ์ขยายตัวความดันสูง.....	54
รูปที่ 4-26 ลักษณะรูปตัดขวางของอุปกรณ์ขยายตัวความดันขึ้นต่ำ.....	55
รูปที่ 4-27 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างมุม A มุมB, พื้นที่ที่ใบพัดกวาดและความยาวใบพัดที่เคลื่อนออกมามาตลอดการหมุนตั้งแต่มุม A เท่ากับ 0 ถึง 180 องศาของอุปกรณ์ขยายความดันต่ำ.....	56
รูปที่ 4-28 ลักษณะของการกันห้องระหว่างแกนหมุนที่มีใบพัดเคลื่อนทำมุม 72 องศา.....	56
รูปที่ 4-29 กราฟแรงบิดที่ได้สูงสุดของอุปกรณ์ขยายตัวความดันต่ำ	58
รูปที่ 4-30 ลักษณะอุปกรณ์ที่ใช้วัดแรงบิดของเครื่องยนต์.....	59

รูปที่ 5-1การประกอบห้องไพบัดเลื่อนของอุปกรณ์ขยายตัวความดันสูง.....	60
รูปที่ 5-2การประกอบ Cylinder (PC 20251190) สวมลงใน Main case high pressure.....	61
รูปที่ 5-3การประกอบชุดประกอบ Rotor กับชุดประกอบ Main case high pressure.....	61
รูปที่ 5-4การใส่ไพบัดเลื่อนภายในช่องของแกน Rotor สำหรับอุปกรณ์ขยายตัวความดันสูง.....	62
รูปที่ 5-5การประกอบ Front end plate กับ Main case high pressure	62
รูปที่ 5-6การประกอบประเก็นและการวางฝา FBC1 กับ Main case high pressure.....	63
รูปที่ 5-7การขันน็อตปิด FBC1 และการปรับแต่งเพื่อให้เพลาลมุนได้สะดวก.....	63
รูปที่ 5-8การประกอบBBCP1และ BBC1 เพื่อปิดฝาหลังของอุปกรณ์ขยายตัว	64
รูปที่ 5-9การขันน็อตเพื่อปิดฝาBBC1ของอุปกรณ์ขยายตัวความดันสูง.....	64
รูปที่ 5-10การประกอบห้องไพบัดเลื่อนของอุปกรณ์ขยายตัวความดันต่ำ	65
รูปที่ 5-11การประกอบ Cylinder กับ Main case low pressure.....	65
รูปที่ 5-12การประกอบชุดประกอบ Rotor กับ Main case low pressure	66
รูปที่ 5-13การเตรียมผิวหน้าก่อนการปิดแผ่น Front end plate	66
รูปที่ 5-14การใส่ไพบัดเลื่อนภายในช่องของแกน Rotor สำหรับอุปกรณ์ขยายตัวความดันต่ำ.....	67
รูปที่ 5-15การใส่ Front end plate กับ Main case low pressure ในตำแหน่งฟิน	67
รูปที่ 5-16การใส่ Front end plate และการปรับแต่งการหมุนของ Rotor.....	68
รูปที่ 5-17การประกอบประเก็นและฝา FBC2 และ BBC2 ของอุปกรณ์ขยายตัวความดันต่ำ	68
รูปที่ 5-18การขันน็อตปิดฝา FBC2 และ BBC 2	68
รูปที่ 5-19ลักษณะการประกอบรอกที่ใช้ในการวัดแรงบิดที่เกิดจากอุปกรณ์ขยายตัวของของไหล..	69
รูปที่ 5-20ลักษณะการประกอบรอกที่ใช้ในการเพิ่มภาระให้กับอุปกรณ์ขยายตัวของของไหล.....	70
รูปที่ 5-21ลักษณะการประกอบรอกเพื่อวัดแรงบิด	70
รูปที่ 5-22ลักษณะการประกอบเครื่องวัดความเร็วรอบแบบดิจิตอลรุ่น MX 019	71
รูปที่ 5-23ตำแหน่งของอุปกรณ์ที่ติดตั้งบนฐานที่ใช้ในการทดสอบ.....	72
รูปที่ 5-24แท่นที่ใช้ปรับสูงต่ำของอุปกรณ์ขยายตัวความดันสูง.....	72
รูปที่ 5-25ติดตั้ง coupling เพื่อเชื่อมรอกกับอุปกรณ์ขยายตัวความดันสูง.....	73
รูปที่ 5-26แสดงค่าตัวแปรต่างๆที่วัดและบันทึกค่าโดย Data logger	73
รูปที่ 5-27อุปกรณ์ที่ใช้วัดและบันทึกค่าอุณหภูมิ,ความดัน.....	74
รูปที่ 6-1สมรรถนะของอุปกรณ์ขยายตัวความดันสูงที่ก๊าซในโตรเจนความดัน 20 บรรยากาศ อุณหภูมิห้อง	76

รูปที่ 6-2 สมรรถนะของอุปกรณ์ขยายตัวความดันต่ำที่ก๊าซไนโตรเจนความดัน 20 บรรยากาศ อุณหภูมิห้อง	77
รูปที่ 6-3 สมรรถนะของอุปกรณ์ขยายตัวความดันสูงที่ก๊าซไนโตรเจนความดัน 25 บรรยากาศ อุณหภูมิห้อง	77
รูปที่ 6-4 สมรรถนะของอุปกรณ์ขยายตัวความดันต่ำที่ก๊าซไนโตรเจนความดัน 25 บรรยากาศ อุณหภูมิห้อง	78
รูปที่ 6-5 สมรรถนะของอุปกรณ์ขยายตัวความดันสูงที่ก๊าซไนโตรเจนความดัน 30 บรรยากาศ อุณหภูมิห้อง	78
รูปที่ 6-6 สมรรถนะของอุปกรณ์ขยายตัวความดันต่ำที่ก๊าซไนโตรเจนความดัน 30 บรรยากาศ อุณหภูมิห้อง	79
รูปที่ 6-7 สมรรถนะของอุปกรณ์ขยายตัวความดันสูงที่ก๊าซไนโตรเจนความดัน 35 บรรยากาศ อุณหภูมิห้อง	79
รูปที่ 6-8 สมรรถนะของอุปกรณ์ขยายตัวความดันต่ำที่ก๊าซไนโตรเจนความดัน 35 บรรยากาศ อุณหภูมิห้อง	80
รูปที่ 6-9 กราฟทำนายสมรรถนะของเครื่องยนต์ที่ก๊าซไนโตรเจนความดัน 20 บรรยากาศ อุณหภูมิห้อง เข้าสู่ระบบ	81
รูปที่ 6-10 กราฟทำนายสมรรถนะของเครื่องยนต์ที่ก๊าซไนโตรเจนความดัน 25 บรรยากาศ อุณหภูมิห้อง เข้าสู่ระบบ	81
รูปที่ 6-11 กราฟทำนายสมรรถนะของเครื่องยนต์ที่ก๊าซไนโตรเจนความดัน 30 บรรยากาศ อุณหภูมิห้อง เข้าสู่ระบบ	82
รูปที่ 6-12 กราฟทำนายสมรรถนะของเครื่องยนต์ที่ก๊าซไนโตรเจนความดัน 35 บรรยากาศ อุณหภูมิห้อง เข้าสู่ระบบ	82
รูปที่ 6-13 อัตราการไหลของมวลไนโตรเจนเข้าสู่ระบบเครื่องยนต์	83
รูปที่ 6-14 อุณหภูมิก๊าซก่อนและภายหลังการเข้าสู่อุปกรณ์ขยายตัวความดันสูง	84
รูปที่ 6-15 อุณหภูมิก๊าซก่อนและภายหลังการเข้าสู่อุปกรณ์ขยายตัวความดันต่ำ	84
รูปที่ 6-16 ความสัมพันธ์ระหว่างความดันจ่ายเข้าระบบกับกำลังงานกลสูงสุดที่ได้	86

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

สถานะการทางพลังงานของประเทศไทยในขณะนี้ มีความเสี่ยงต่อการขาดแคลนพลังงานอย่างยิ่งสาเหตุหลัก คือ เราจำเป็นต้องนำเข้าพลังงานเกือบทั้งหมดจากต่างประเทศ นับสำคัญทางพลังงานเปรียบเสมือนสายโลหิตใหญ่หล่อเลี้ยงร่างกาย ถ้าเราไม่สามารถพึ่งพาตนเองได้แล้ว เราก็จะไม่สามารถดำรงชีวิตอย่างปกติสุขได้ ความพอเพียงทางพลังงานเป็นสิ่งจำเป็นตลอดจนการแข่งขันทางเศรษฐกิจก็เป็นปัจจัยหลักของการบริหารจัดการพลังงาน การณรงค์ให้ประหยัดพลังงานเป็นสิ่งที่ดีควรกระทำแต่ไม่ใช่การแก้ปัญหาพลังงานที่ต้นเหตุ เพราะเราจำเป็นต้องพึ่งพาตนเองได้ในอนาคตนั้นจึงจะสามารถแก้ปัญหาได้อย่างเบ็ดเสร็จ สิ่งสำคัญรองลงมาที่จำเป็นต้องพิจารณาอย่างเร่งด่วนควบคู่กันไป คือ ผลผลิตจากการบริโภคพลังงานอย่างไร ประสิทธิภาพก่อให้เกิดปัญหาหลักสองประการ คือ ความร้อนสะสมในบรรยากาศที่เพิ่มขึ้นอย่างมหาศาล และปัญหามลภาวะทางอากาศที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงพลังงานโดยอาศัยการเปลี่ยนแปลงทางเคมี มีนักเศรษฐศาสตร์บางท่านประเมินว่าการลงทุนเพื่อแก้ปัญหาดังกล่าวที่เกิดขึ้นในสิ่งแวดล้อมมีมูลค่าพอๆกับมูลค่าทางพลังงานที่เราบริโภคยกตัวอย่าง เช่น ปัญหาสุขภาพของประชากร ปัญหาที่เกิดจากภัยพิบัติที่รุนแรงขึ้นเรื่อยๆ เป็นต้น ดังนั้น การเปลี่ยนแปลงพฤติกรรมและความเข้าใจแบบสหวิทยา ของการบริโภคพลังงานควรจะได้มีการประชาสัมพันธ์ให้ประชาชนทราบโดยทั่วกันจะได้ตระหนักถึงความจำเป็น เมื่อเราพิจารณาแหล่งพลังงานที่เราใช้กันในปัจจุบันปรากฏว่าส่วนใหญ่เป็นแหล่งพลังงานฟอสซิล ที่ได้จากการขุดเจาะ และสำรวจซึ่งใช้แล้วหมดไปอย่างไรก็ตามเป็นที่น่ายินดีที่หลายประเทศมีความจริงจัง และพัฒนาแหล่งพลังงานทางเลือกอย่างกว้างขวาง รวมถึงรัฐบาลไทยที่มีนโยบายทางพลังงานที่เด่นชัด การพึ่งพาพลังงานทางเลือกในอนาคตจะต้องเกิดขึ้นอย่างแน่นอน แต่ถึงอย่างไรการเปลี่ยนแปลงจะต้องค่อยเป็นค่อยไปเพื่อให้ผลกระทบในระบบเศรษฐกิจเกิดขึ้นน้อยที่สุด เนื่องจากแหล่งพลังงานฟอสซิลยังคงมีการค้นพบแหล่งใหม่อย่างต่อเนื่องซึ่งเป็นอุปสรรคในการพัฒนาแหล่งพลังงานทางเลือกชนิดอื่น เพราะมีราคาต่อพลังงานถูกกว่าโดยราคาดังกล่าวยังไม่รวมค่าแก้ปัญหาที่เกิดจากการใช้พลังงานดังกล่าวข้างต้นถึงกระนั้นเมื่อเราพิจารณาถึงแหล่งที่มาของพลังงานบนโลก นั้นเกือบทั้งหมดมาจากดวงอาทิตย์ โดยมีสองรูปแบบหลักคือ พลังงานที่สะสมมาเป็นเวลานานก่อนที่มนุษย์จะเริ่มบริโภคพลังงาน

อย่างมากเกินไปเมื่อประมาณ 200 กว่าปีที่ผ่านมา เช่น แหล่งพลังงานฟอสซิล แหล่งพลังงานยูเรเนียม แหล่งพลังงานความร้อนใต้พิภพ เป็นต้น และ พลังงานในรูปแบบการแผ่รังสีจากดวงอาทิตย์ที่ยังเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องทุกวันซึ่งก่อให้เกิดอนุพันธ์ทางพลังงานหลายรูปแบบ เช่น พลังงานลม พลังงานน้ำที่เก็บกักไว้ในเขื่อน พลังงานน้ำขึ้นน้ำลง พลังงานที่เกิดจากการสังเคราะห์แสงของพืช เป็นต้น

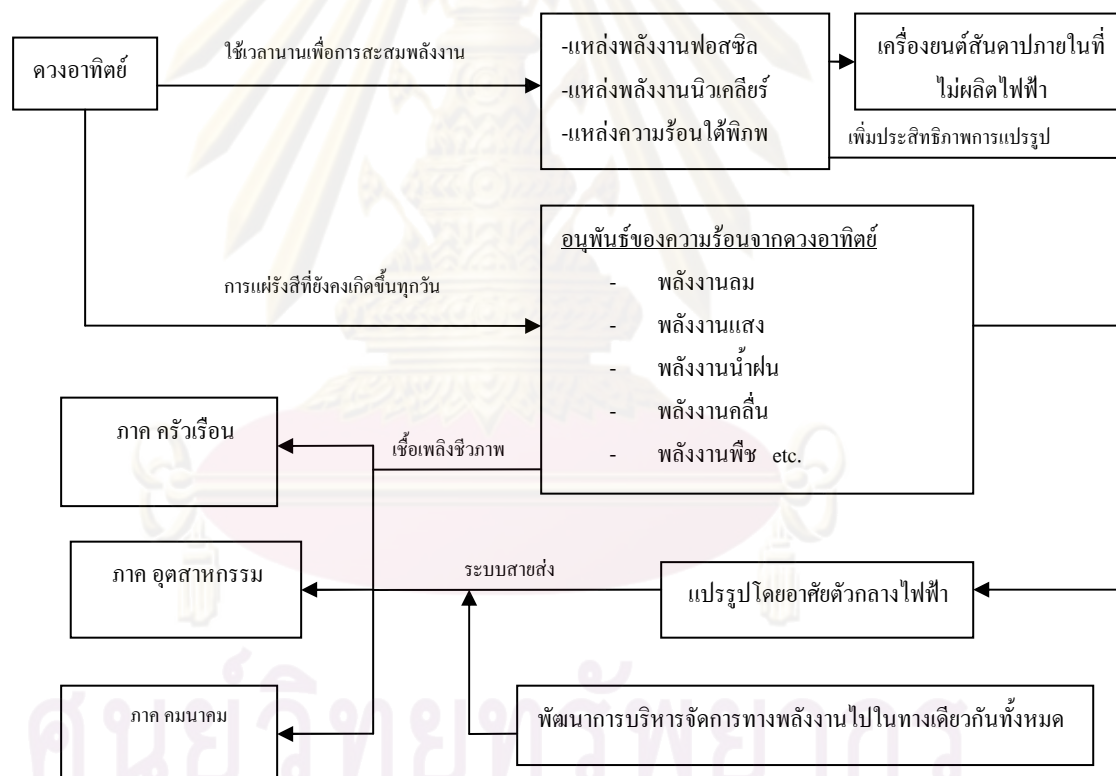
อนึ่งการใช้พลังงานที่ได้จากการแผ่รังสีของดวงอาทิตย์ในปัจจุบันมีหลายรูปแบบ แต่การได้มาซึ่งพลังงานนั้นจำเป็นต้องอาศัยพื้นที่ผิวโลกและเทคโนโลยีในการแปรเปลี่ยนรูปแบบของพลังงาน โดยส่วนใหญ่ยังอยู่ในขั้นตอนของการพัฒนาประสิทธิภาพและความเหมาะสมของภูมิประเทศ ภูมิอากาศ เมื่อเราพิจารณาการแปรเปลี่ยนรูปแบบของพลังงานดังกล่าวพบว่าเกือบทั้งหมดแปรเปลี่ยนเป็นไฟฟ้า ซึ่งเป็นรูปแบบของพลังงานที่มีข้อดีในด้านการส่งถ่ายพลังงานและแปรเปลี่ยนเป็นพลังงานรูปแบบอื่นได้ง่าย (สามารถใช้ได้ง่าย) แต่จำเป็นต้องอาศัยตัวนำไฟฟ้าในการส่งถ่ายพลังงาน โดยปัจจุบันไฟฟ้าเป็นตัวกลางทางพลังงานชนิดหลักในภาคครัวเรือน ภาคอุตสาหกรรมและภาคคมนาคมบางส่วน เมื่อวิเคราะห์เหตุปัจจัยที่ภาคคมนาคมยังคงใช้พลังงานไฟฟ้าเป็นบางส่วนเพราะพลังงานไฟฟ้ายังคงมีประสิทธิภาพต่ำในการเก็บกักพลังงานให้สามารถประยุกต์ใช้เทียบกับแหล่งพลังงานฟอสซิล ในการที่จะติดตั้งกับพาหนะที่ต้องเคลื่อนที่โดยไม่อยู่ติดกับสายส่งไฟฟ้า การเก็บกักพลังงานไฟฟ้าโดยตรงในปัจจุบันโดยอาศัยแบตเตอรี่ซึ่งยังคงได้รับการพัฒนาอย่างต่อเนื่องก็ยังคงมีความจุพลังงานต่อน้ำหนักในระดับที่ไม่เป็นที่น่าพอใจ ในขณะที่ช่วงเวลาในการเติมพลังงานก็ยังคงใช้เวลานาน แต่ถ้าเกิดมีการพัฒนาต่อจนเป็นที่น่าพอใจ หรือสามารถใช้แทนรถยนต์เครื่องยนต์สันดาปได้เราก็จะต้องมาคิดถึงวิธีการกำจัดแบตเตอรี่อีกที เพราะขยะแบตเตอรี่เป็นขยะมีพิษในปัจจุบันก็ยังคงเป็นปัญหาในหลายประเทศ ในขณะเดียวกันการพัฒนาการเก็บพลังงานไฟฟ้าโดยอาศัยตัวกลางทางพลังงานอื่นเช่น ก๊าซไฮโดรเจน ก็ยังได้รับการพัฒนาอย่างต่อเนื่องซึ่งในปัจจุบันก็มีให้เห็นบ้างแล้ว เนื่องจากการแยกก๊าซไฮโดรเจนออกจากน้ำโดยการใช้ไฟฟ้ายังคงมีราคาแพงเทียบกับการแยกก๊าซไฮโดรเจนจากสารประกอบไฮโดรคาร์บอน(แหล่งพลังงานฟอสซิล) ดังนั้นส่วนใหญ่อีกยังคงใช้ก๊าซที่ได้จากการแยกโดยโรงกลั่นน้ำมันอยู่ ในกรณีที่การพัฒนาการแยกน้ำให้มีประสิทธิภาพมากขึ้นเราจะเห็นว่าการได้มาซึ่งก๊าซไฮโดรเจนนี้จะต้องประกอบไปด้วยน้ำบริสุทธิ์และไฟฟ้าโดยน้ำทุกๆ 18 กรัมจะได้ก๊าซไฮโดรเจน 2 กรัม และก๊าซออกซิเจน 16 กรัม ซึ่งถ้าการใช้พลังงานไฮโดรเจนในรถยนต์ใช้กันอย่างแพร่หลายแล้วการผลิตก๊าซไฮโดรเจนในอนาคตจำเป็นต้องมีการบริหารการใช้น้ำควบคู่กันไปด้วยซึ่งน่าจะเป็นข้อจำกัดทางพลังงานที่สำคัญเพราะในปัจจุบันทรัพยากรน้ำก็ยังคงประสบภาวะขาดแคลนอยู่ เมื่อได้พิจารณาถึงปัญหาที่จะติดตามมาในอนาคตจากการใช้พลังงานจากตัวกลาง

ไฮโดรเจนจากการแยกน้ำแล้วน่าจะพิจารณาถึงแหล่งที่มาของสารประกอบตัวอื่นๆด้วยเพื่อใช้ทดแทนน้ำ ในปัจจุบันก็ยังคงมีการพัฒนาการใช้ตัวกลางทางพลังงานประเภทอื่นๆอีกหลายประเภทรวมถึงตัวกลางที่ยังได้รับการพัฒนาอยู่ในขณะนี้โดยใช้อากาศอัดแรงดันก็เป็นอีกตัวกลางหนึ่งที่น่าสนใจเพราะอากาศมีอยู่ทุกที่และไม่เป็นพิษกับสิ่งมีชีวิต โดยพลังงานที่เก็บกักไว้สามารถเพิ่มโดยการเก็บที่ความดันเก็บที่มากขึ้น เนื่องจากพลังงานต่อน้ำหนักของอากาศอัดความดันน้อยมากเมื่อเทียบกับรูปแบบพลังงานอื่น พิจารณาแล้วเห็นว่าไม่สามารถทดแทนความต้องการในการบริโภคพลังงานในปัจจุบันได้ถ้ายังคงไม่ตระหนักถึงการเพิ่มประสิทธิภาพการใช้พลังงาน แต่เมื่อพิจารณาปัญหาสิ่งแวดล้อมในอนาคตที่ติดตามมามีน้อยกว่าตัวกลางพลังงานประเภทอื่น ดังนั้นการพัฒนาการใช้ตัวกลางอากาศแรงดันสูงจึงยังคงมีความน่าสนใจโดยหัวข้อหลักในการพัฒนาจะเกี่ยวข้องกับการเพิ่มประสิทธิภาพการเก็บและใช้พลังงานในขั้นตอนการขยายตัวของอากาศ ซึ่งหัวข้อที่จะกล่าวถึงในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะเน้นที่การศึกษาการขยายตัวของอากาศให้มีประสิทธิภาพทางพลังงานที่ดีขึ้น



รูปที่1-1แผนที่ของการส่งผ่านพลังงานจากต้นกำเนิดถึงแหล่งที่ใช้พลังงานในปัจจุบัน

จากรูปที่ 1-1 จะเห็นว่าถ้าเราใช้แหล่งฟอสซิลเป็นต้นกำลังในเครื่องยนต์สันดาปเราจะมี การเปลี่ยนรูปแบบพลังงานแค่ครั้งเดียวโดยประสิทธิภาพการเปลี่ยนพลังงานของเครื่องยนต์สำหรับ รถยนต์ทั่วไปปัจจุบันประมาณไม่เกิน 30 % แต่ถ้าเราใช้แหล่งพลังงานฟอสซิลในการผลิต กระแสไฟฟ้าจนถึงแหล่งที่ใช้พลังงาน นั้นจะต้องมีการเปลี่ยนรูปเป็นไฟฟ้าแล้วจึงส่งตามสายส่งซึ่ง ประสิทธิภาพทางพลังงานจะลดลงตามลำดับในความเป็นจริงแล้วยังจะเป็นการง่ายกว่าถ้าเราเพิ่ม ประสิทธิภาพของเครื่องยนต์สันดาปขนาดใหญ่ที่ใช้ผลิตกระแสไฟฟ้าและบริหารจัดการพลังงาน รวมถึงจำกัดขอบเขตของมลพิษที่เกิดจากการเปลี่ยนรูปพลังงาน ในขณะเดียวกันเรายังรองรับแหล่ง พลังงานอนุพันธ์ของดวงอาทิตย์ทุกรูปแบบได้อีกด้วยซึ่งมีความจำเป็นต้องเพิ่มสัดส่วนทางพลังงาน ในอนาคตอย่างแน่นอน



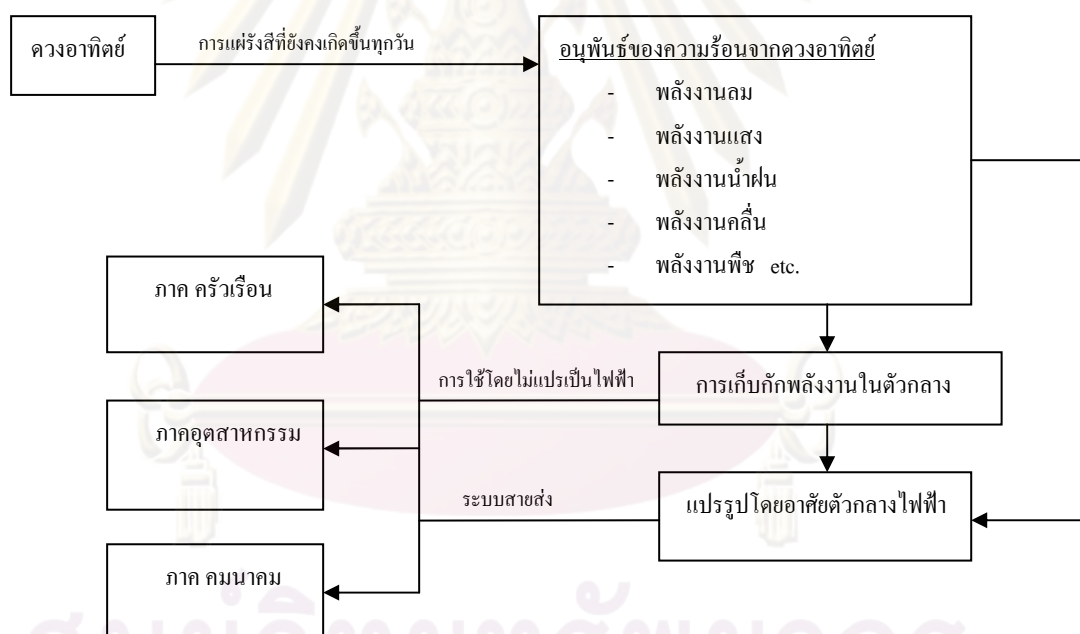
รูปที่1-2 แผนที่การส่งผ่านพลังงานในช่วงการเปลี่ยนแปลงจากแหล่งพลังงานถึงแหล่งใช้พลังงาน

การเปลี่ยนแปลงแบบบูรณาการนั้นจะต้องทำแบบค่อยเป็นค่อยไปเพื่อลดผลกระทบทางเศรษฐกิจและการดำเนินชีวิตของประชาชนเมื่อมองในมุมของประเทศไทยนั้นน่าจะมีอยู่สองทางเลือกในปัจจุบันที่จะทำให้ผลกระทบทางเศรษฐกิจเกิดขึ้นน้อยที่สุดคือ

1 นำการผลิตกระแสไฟฟ้าด้วยปฏิกิริยานิวเคลียร์มาใช้ระหว่างการเปลี่ยนไปใช้แหล่งพลังงานอนุพันธ์จากดวงอาทิตย์เพราะมีต้นทุนทางพลังงานต่ำกว่าแหล่งฟอสซิล

2 ลดการใช้พลังงานที่ผลิตจากแหล่งฟอสซิลโดยไม่เกิดผลประโยชน์ทางเศรษฐกิจอย่างมีนัยสำคัญและนำส่วนต่างของการบริโภคดังกล่าวมาพัฒนาการใช้พลังงานอนุพันธ์จากดวงอาทิตย์

อย่างไรก็ตามไม่ช้าก็เร็วลักษณะการใช้พลังงานจะต้องเปลี่ยนไปเป็นระบบที่พลังงานมาจากแหล่งเดียวกันคืออาศัยการแผ่รังสีของดวงอาทิตย์ ดังนั้นการระลึกถึงจุดหมายของการใช้พลังงานร่วมกันจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องเริ่มเปลี่ยนแปลงมิใช่แค่คิดอย่างเดียวเพราะปัญหาที่แก้ไม่ได้ในอนาคตมักเกิดจากการไม่ตระหนักถึงปัญหาที่จะเกิดตามมาอย่างเช่น ปัญหาราคาน้ำมัน



รูปที่ 1-3 แผนที่การส่งผ่านพลังงานจากแหล่งกำเนิดถึงแหล่งที่ใช้พลังงานในอนาคต

1.2 วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์

เพื่อศึกษารูปแบบและวิธีการใช้อากาศหรือก๊าซในโตรเจนอัดความดันเป็นต้นกำลังของเครื่องยนต์ให้สามารถทำงานได้โดยอาศัยการขยายตัวของสารทำงานเป็นลำดับ

1.3 วิธีการดำเนินงาน

- 1) ศึกษาทฤษฎีของการใช้พลังงานที่ได้จากของไหลอัดความดัน
- 2) ศึกษาเครื่องมืออุปกรณ์ขยายตัวของก๊าซและออกแบบชิ้นส่วนประกอบเพิ่มเติม
- 3) ออกแบบระบบที่ทำให้อุปกรณ์ขยายตัวของอากาศแบบขยายตัวสองชั้นสามารถทำงานได้
- 4) ออกแบบอุปกรณ์ที่ใช้ในการสร้างภาระให้กับอุปกรณ์ขยายตัว รวมถึงอุปกรณ์การวัดอุณหภูมิ, ความดัน
- 5) ประกอบและติดตั้งอุปกรณ์เพื่อทดสอบระบบเครื่องยนต์
- 6) ทดสอบการทำงานจริงกับระบบ โดยเปลี่ยนเงื่อนไขที่ใช้ในการทดลอง
- 7) สรุปผลการวิจัยและพิมพ์วิทยานิพนธ์ฉบับสมบูรณ์

1.4 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์

- 1) ศึกษาทฤษฎีของการใช้พลังงานที่ได้จากของไหลอัดความดัน
- 2) ออกแบบระบบที่ทำให้อุปกรณ์ขยายตัวของอากาศแบบขยายตัวสองชั้นสามารถทำงานได้
- 3) ประกอบและติดตั้งอุปกรณ์เพื่อทดสอบระบบเครื่องยนต์
- 4) แก้ไขปรับปรุงชิ้นส่วนอุปกรณ์เพื่อให้ระบบทำงานได้
- 5) เก็บข้อมูลที่จำเป็นสำหรับการบ่งชี้สมรรถนะ

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

เป็นแนวทางในการพัฒนาเครื่องยนต์ที่ใช้อากาศอัดแรงดันในขั้นต่อไป โดยประเด็นหลักคือการใช้พลังงานให้ได้อย่างคุ้มค่าโดยที่ไม่ก่อให้เกิดมลพิษในบริเวณที่ใช้พลังงาน และไม่เหลือขยะมีพิษในสิ่งแวดล้อม

1.6 เนื้อหาในวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์นี้แบ่งเนื้อหาเป็นทั้งหมด 7 บท กับ 1 ภาคผนวก บทที่ 1 กล่าวถึงที่มาและความสำคัญของปัญหา รวมถึงวัตถุประสงค์และวิธีการดำเนินการวิจัย บทที่ 2 กล่าวถึงประวัติงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง และแนวทางในการทำวิจัย บทที่ 3 กล่าวถึงทฤษฎีพื้นฐานที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบระบบเครื่องยนต์ที่ใช้อากาศอัดความดันเป็นต้นกำลัง บทที่ 4 กล่าวถึงการออกแบบเครื่องยนต์ต้นแบบ บทที่ 5 กล่าวถึงการสร้างและการติดตั้งอุปกรณ์ บทที่ 6 การเก็บข้อมูลและผลการทดลองบทที่ 7 กล่าวถึงบทสรุปและข้อเสนอแนะ ผนวก อธิบายถึงข้อมูลทางอุณหภูมิของ

อุปกรณ์ขยายตัวขั้นสูงและขั้นต่ำ และอุปกรณ์การวัดที่ใช้ในการทดลอง รวมถึง โปรแกรมที่ใช้ในการบันทึกค่าอุณหภูมิและความดันของระบบอุปกรณ์ขยายตัว



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

เนื้อหาในบทนี้จะกล่าวถึงประวัติ และผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องการใช้พลังงานจากก๊าซเหลวหรือก๊าซอัดความดันสูง แบ่งเป็น ประวัติของเครื่องยนต์ที่ใช้อากาศอัดความดันเป็นต้นกำลัง และผลงานวิจัยที่เกี่ยวกับการใช้พลังงานจากการขยายตัวของก๊าซ

2.1 ประวัติของเครื่องยนต์ที่ใช้อากาศอัดเป็นต้นกำลัง

หัวรถจักรที่ใช้เครื่องยนต์อากาศอัดความดันเป็นต้นกำลังเครื่องแรกได้รับการพัฒนา มาตั้งแต่ช่วง ค.ศ. 1820 ถึงช่วง ค.ศ. 1980 หรือประมาณ 110 ปีหลังจากมนุษย์รู้จักเครื่องจักรไอน้ำที่ถูกพัฒนาโดย Thomas Newcomen ที่ใช้เพื่อการสูบน้ำในเหมืองแร่ (1710s) แต่เนื่องจากวัสดุในการทำเครื่องจักรให้มีประสิทธิภาพยังไม่มีในยุคนั้นดังนั้นจึงเป็นเครื่องจักรที่ไม่ได้รับความสนใจ จนกระทั่งประมาณ ค.ศ.1980 ในประเทศบราซิลมีการใช้ต้นกำลังจากอากาศอัดแรงดันในลักษณะงานเฉพาะทางที่พัฒนาโดย Oskar H.W. Coest จาก บริษัท Aeromovel Global Corp [12],[16]

หัวรถจักรของ Mekarski (1886 – 1900) Mekarski ได้พัฒนาเครื่องยนต์ที่ใช้อากาศอัดเป็นต้นกำลังโดยใช้การขยายตัวของอากาศแบบ หนึ่งขั้น โดยการให้ความร้อนจากหม้อน้ำก่อนการขยายตัวในลูกสูบและควบแน่นน้ำที่ถ่ายเทความร้อนให้อากาศแล้วให้เป็นวัฏจักรติดต่อกัน

หัวรถจักรของ Robert Hardie (1892 – 1900) หัวรถจักรของ Robert ใช้เป็นแบบลูกผสมระหว่างเครื่องจักรไอน้ำและอากาศอัดแรงดัน ซึ่งได้รับการสนับสนุนจาก General Herman Haupt วิศวกรโยธาที่รับผิดชอบระบบขนส่งของ New York City ให้ทดลองใช้งานภายในเมือง โดยการขยายตัวของอากาศแบบ หนึ่งขั้นด้วยการให้ความร้อนก่อนการขยายตัวในหลายๆทาง เช่น ความร้อนที่เกิดจากการเบรกรถ ความร้อนที่เกิดจากน้ำเดือดและกำลังลดความร้อนลง เป็นต้น โดยส่งความร้อนที่เกิดขึ้นไปที่ถังเก็บความดัน [12],[16]

หัวรถจักรของ Hoadley – Knight (1896 – 1900) เป็นเครื่องยนต์ที่ใช้อากาศอัดแรงดันเครื่องแรกที่ใช้การขยายตัวของอากาศ แบบสองขั้น โดยให้อากาศอยู่ในขบวนการขยายตัวนานขึ้นเพื่อรับความร้อนจากแหล่งภายนอกโดยการนำความร้อนจากบรรยากาศโดยตรง อากาศที่เก็บอยู่ที่ความดัน 18-25 Bar สามารถเคลื่อนที่พร้อมสัมภาระได้ระยะทางประมาณ 1000 เมตร [12]

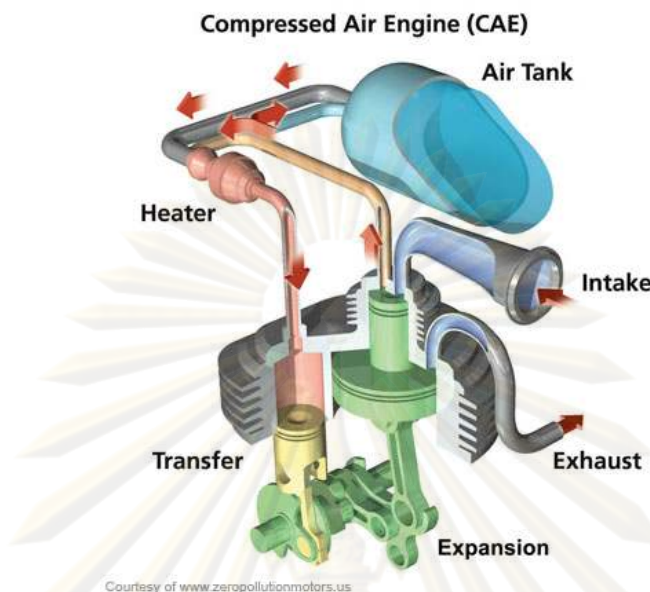
หัวรถจักรของ H.K. Porter (1896 - 1930) เป็นเครื่องยนต์ที่ใช้อากาศอัดแรงดันโดยการใช้การขยายตัวของอากาศ แบบสองขั้นโดยใช้ inter heaters ในการให้ความร้อนเพิ่มเติมใน

ขบวนการขยายตัวของอากาศภายในลูกสูบทั้งสอง ซึ่งผู้ประดิษฐ์ Charles B. Hodges เป็นคนแรกที่สามารถขยายตัวรังจักรให้กับธุรกิจอุตสาหกรรมการทำเหมืองถ่านหินในภาคตะวันออกของอเมริกา โดยอากาศที่เก็บอยู่ที่ความดัน 40 Bar และใช้ความดันในการขยายตัวขั้นแรกที่ประมาณ 13 Bar จนกระทั่งปัจจุบันกลายเป็นมาตรฐานของหัวรังจักรการทำเหมืองถ่านหินเนื่องจากไม่มีประกายไฟเกิดขึ้นในระบบสร้างกำลังซึ่งเป็นอันตราย อีกทั้งยังช่วยอัดอากาศภายในเหมืองให้ก๊าซที่สามารถติดไฟได้ระบายออกมาด้วย [12]

หัวรังจักรที่ใช้เครื่องยนต์ที่มีการขยายตัวของอากาศอัดแรงดัน แบบ 3 ชั้น (1912 - 1930) เมื่อสิทธิบัตรของ Hodges ถูกพัฒนาต่อโดยวิศวกรหลายคนในขณะนั้นในทวีปยุโรป ซึ่งได้เพิ่มลำดับขั้นการขยายตัวของอากาศและพัฒนา inter heaters เพื่อให้ความร้อนในขบวนการขยายตัว ซึ่งเป็นเครื่องยนต์ที่ได้รับความนิยมมากในธุรกิจการทำเหมืองถ่านหิน ไม่ว่าจะเป็นฝรั่งเศส เยอรมนี เบลเยียม และ อีกหลายประเทศ ในทวีปยุโรป ซึ่งเครื่องยนต์นี้น่าจะเป็นที่นิยมหรือพัฒนาการใช้ในพาหนะส่วนบุคคล แต่ปรากฏว่ามีการค้นพบแหล่งเชื้อเพลิงฟอสซิลในรูปของเหลวซึ่งมีค่าพลังงานความร้อนสูง และสามารถใช้ได้ง่ายกว่าสำหรับพาหนะส่วนบุคคล ซึ่งเรารู้จักกันดีนั่นคือน้ำมัน ดังนั้นเครื่องยนต์ที่มีอากาศอัดแรงดันเป็นต้นกำลังจึงค่อยๆเสื่อมความนิยมลง แต่ก็ยังคงเป็นเครื่องจักรกลหลักในการทำเหมืองแม้กระนั้นการส่งลมโดยท่อลมให้กับเครื่องยนต์อัดลมแบบขยายตัวหนึ่งขั้นจะได้รับการพัฒนาต่อมามากกว่าก็ตาม [12],[16]

หัวรังจักรที่ใช้ เครื่องยนต์ลูกผสมระหว่างเครื่องยนต์ดีเซลกับเครื่องยนต์อากาศอัดแรงดัน (1930 - 1940) ในขณะที่การพัฒนาเครื่องยนต์สันดาปภายในบรรลุถึงขีดสุดประเทศเยอรมนีได้พัฒนาหัวรังจักรที่ (1200 Hp) มีต้นกำลังคือเครื่องยนต์ดีเซล โดยให้ความร้อนสูญเสียจากการสันดาปแลกเปลี่ยนมาใน inter heaters ของเครื่องยนต์อากาศอัดแรงดันเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการขยายตัวจากวิธีดังกล่าวทำให้หัวรังจักรนี้ได้ระยะทางในการเคลื่อนที่มากกว่าตอนใช้เครื่องยนต์ดีเซลอย่างเดียวถึงประมาณ 26 % [12]

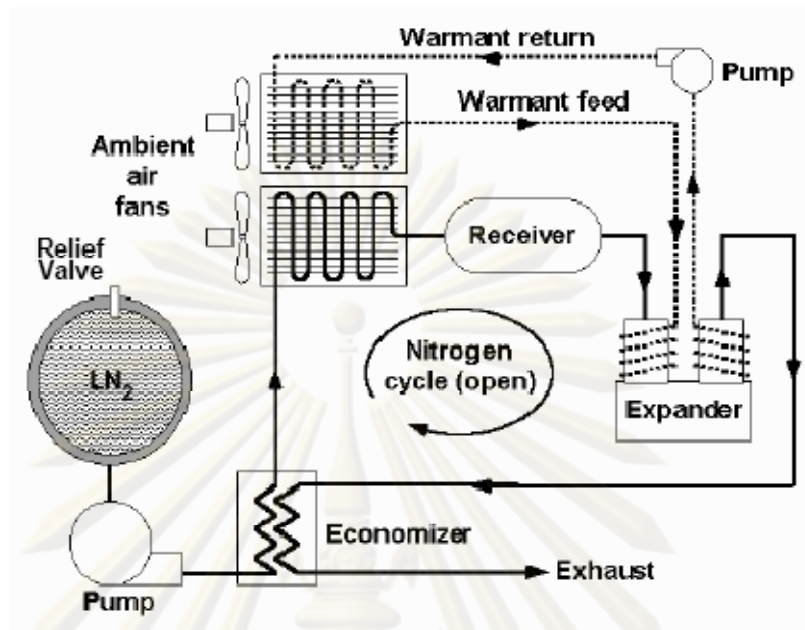
Guy Negre and MDI (2002) วิศวกรชาวฝรั่งเศสและบริษัท MDI Moteur Development International ได้ผลิตเครื่องยนต์นั่งส่วนบุคคลที่ใช้เครื่องยนต์ที่ต้นกำลังเป็นอากาศอัดแรงดัน โดยอากาศขยายตัว 3 ชั้น ในขบวนการขยายตัวโดยแหล่งอากาศความดันสูงมีความดัน 300 Bar ปริมาตร 300 ลิตร โดยสามารถขับเคลื่อนด้วยความเร็ว 96 กิโลเมตรต่อชั่วโมงได้ระยะทางถึง 200 กิโลเมตร กำลังงานสูงสุดประมาณ 15-20 KW เขาวางแผนที่จะผลิตเครื่องยนต์นี้ในหลายประเทศ ไม่ว่าจะเป็นเม็กซิโก แอฟริกาใต้ สเปน เป็นต้น (WWW.theaircar.com) [11]



รูปที่ 2-1 ลักษณะเครื่องยนต์ที่ใช้อากาศอัดเป็นต้นกำลังของ MDI [11]

2.2 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวกับการใช้พลังงานจากการขยายตัวของก๊าซ

C.Knowlen ,A.T. Mattick,A.P. Bruckner and A. Hertzberg แห่ง Aerospace and Energetics Research Program University of Washington Seattle ,WA (1998) ได้พัฒนาและทำการทดลองเครื่องยนต์ที่ใช้ก๊าซเหลวผ่านขบวนการขยายตัวเป็นแหล่งพลังงานของเครื่องยนต์ ได้แก่ ก๊าซไนโตรเจน ก๊าซมีเทน (ก๊าซธรรมชาติ) ก๊าซออกซิเจน และ ก๊าซอีเทน เพื่อขับเคลื่อนพาหนะส่วนบุคคล โดยสรุปผลการทดลองคือสามารถดึงพลังงานจากการขยายตัวของก๊าซเหลวสองอย่างระหว่างไนโตรเจนและ มีเทนได้ประมาณ 200-380 KJ/Kg ของก๊าซไนโตรเจน ถ้าใช้ก๊าซสามอย่างคือไนโตรเจน มีเทน และ อีเทนสามารถดึงพลังงานจากการขยายตัวของก๊าซเหลวได้ประมาณ 300 - 450 KJ/Kg ของก๊าซไนโตรเจน โดยขึ้นกับประสิทธิภาพการขยายตัวเมื่อเทียบกับขบวนการอุณหภูมิคงที่ โดยขบวนการดังกล่าวไม่มีการเผาไหม้เชื้อเพลิงแต่อย่างใด [4]



รูปที่ 2-2 แผนผังการขยายตัวของไนโตรเจนเหลว

Tsu – Chin Tsao (2003) ศาสตราจารย์ ทางด้านเครื่องกลและทางด้านวิศวกรรมอากาศยานศาสตร์ (Professor of mechanical and aerospace engineering) แห่งมหาวิทยาลัย UCLA กำลังพัฒนาการใช้อากาศอัดความดันผสมกับเครื่องยนต์สันดาปในรถยนต์นั่งส่วนบุคคลโดยควบคุมการใช้พลังงานจากสองแหล่งในสถานะต่างๆ (Hybrid air engine for car) จากการคำนวณประเมินว่าการใช้เครื่องยนต์ดังกล่าวในเมือง (การจราจรหนาแน่น) จะทำให้ประหยัดน้ำมันประมาณ 64 % และถ้าให้ในถนนหลวง (การจราจรไม่หนาแน่น) จะประหยัดน้ำมันประมาณ 12 % ซึ่งมีนัยสำคัญในการพัฒนาเป็นอย่างมาก [18]

K. David Huang , Wei Chuan Chang แห่ง Vehicular Engineering Dayeh University ,Changhua ,ประเทศ ไต้หวัน และ Sheng – Chung Tzeng แห่ง Department of Mechanical Engineer ,Chic kuo Technology University, Changhua ,ประเทศ ไต้หวัน (2004)

ได้ทำการจำลองระบบการใช้พลังงานร่วมระหว่างเชื้อเพลิงและระบบนิวเมติก เพื่อเป็นต้นกำลังในพาหนะส่วนบุคคล ด้วยเงื่อนไขต่างๆ โดยใช้ ITI –Sim simulation Software ในการวิเคราะห์ผล โดยสรุปผลการทดลองครั้งนี้ การบีบอัดก๊าซเพื่อเป็นต้นกำลังในระบบนิวเมติกควรทำเมื่อเครื่องยนต์สันดาปภายในอยู่ในสถานะเหมาะสม (Optimal state) โดยจะได้ประสิทธิภาพโดยรวมของระบบสูงขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ รวมถึงการบริโภคเชื้อเพลิงต่ำลงและเครื่องยนต์ปล่อยก๊าซพิษลดลง ความร้อนสูญเสียจากเครื่องยนต์สันดาปภายในสามารถนำกลับมาเพิ่มประสิทธิภาพการขยายตัวของอากาศอัดได้ดังนั้นประสิทธิภาพทางความร้อนของระบบรวมจึงเพิ่มขึ้น [3]

2.3 แนวทางในการทำวิจัย

งานวิจัยนี้จะทำการศึกษาเครื่องยนต์ที่ใช้ก๊าซในโตรเจนอัดความดันสูงเป็นต้นกำลังโดย ออกแบบให้เครื่องยนต์ประกอบไปด้วยอุปกรณ์ขยายตัวสองชั้น และสร้างเครื่องยนต์เพื่อใช้ในการศึกษาระบบ โดยการวัดค่าภาระทางกลที่เครื่องยนต์ต้นแบบสามารถทำงานได้ รวมถึงค่า อุณหภูมิ, ความดันของก๊าซก่อนเข้าและออกจากระบบ เพื่อเป็นแนวทางในการพัฒนาเครื่องยนต์ที่ ใช้อากาศอัดแรงดันในขั้นต่อไป



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 3

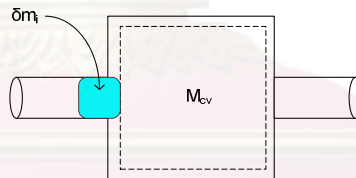
ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

3.1 ทฤษฎีเบื้องต้นทางอุณหพลศาสตร์เพื่อวิเคราะห์การอัดและขยายตัวของอากาศ

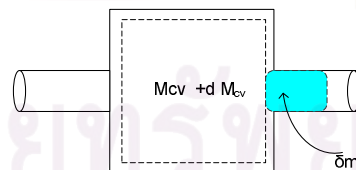
การศึกษาและสร้างเครื่องยนต์ที่ใช้อากาศอัดเป็นต้นกำลังหรือระบบของอุปกรณ์ขยายตัวของของไหลจำเป็นต้องทราบถึงวิธีการประเมินความเป็นไปได้ในทางทฤษฎีเบื้องต้นก่อนเพื่อเป็นแนวทางในการออกแบบต่อไป

3.1.1 กฎการอนุรักษ์มวลของปริมาตรควบคุม

เมื่อระบบที่สนใจเป็นปริมาตรควบคุมโดยมีการไหลเข้าออกของของไหลทำงานเท่ากับ δm_i และ δm_e ตามลำดับ โดยกำหนดให้เส้นไขว่ปลาแสดงขอบเขตของระบบ ซึ่งครอบคลุมมวลจำนวนเดียวกันในช่วงเวลา t ถึง $t + dt$ โดยมวลในปริมาตรควบคุมเปลี่ยนแปลงไป dm_{cv} ดังรูป



เมื่อเวลา t มีมวลไหลเข้าระบบ δm_i โดยในระบบมีมวลอยู่แล้ว M_{cv}



เมื่อเวลา $t + dt$ มีมวลไหลออกจากระบบ δm_e โดยในระบบมีมวลรวม $M_{cv} + d M_{cv}$

รูปที่ 3-1 แสดงการไหลเข้าและออกของของไหลทำงานผ่านปริมาตรควบคุม

จากสมการอนุรักษ์มวลของระบบเมื่อเวลาผ่านไป dt

$$\begin{aligned}
 (dm)_{\text{ระบบ}} &= 0 \\
 (M_{cv} + dM_{cv} + \delta m_e) - (M_{cv} + \delta m_i) &= 0 \\
 dM_{cv} + \delta m_e - \delta m_i &= 0 \dots\dots\dots(3.1)
 \end{aligned}$$

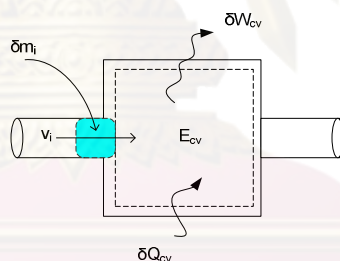
สมการ 3.1 เป็นสมการการอนุรักษ์ของมวลสำหรับปริมาตรควบคุมของอากาศที่ไหลผ่านอุปกรณ์

3.1.2 กฎข้อที่หนึ่งของอุณหพลศาสตร์สำหรับปริมาตรควบคุม

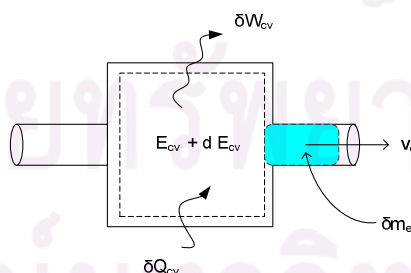
จากกฎข้อที่หนึ่งของอุณหพลศาสตร์

$$\delta Q = dE + \delta W$$

เมื่อระบบที่สนใจเป็นปริมาตรควบคุมโดยมีการไหลเข้าออกของของไหลทำงานเท่ากับ δm_i และ δm_e ตามลำดับ โดยกำหนดให้เส้นไขปลาแสดงขอบเขตของระบบ ซึ่งครอบคลุมมวลจำนวนเดียวกันในช่วงเวลา t ถึง $t + dt$ โดยระดับพลังงานในปริมาตรควบคุมเปลี่ยนแปลงไป dE_{cv} ดังรูป



เมื่อเวลา t มีมวลไหลเข้าระบบ δm_i โดยในระบบมีพลังงานอยู่แล้ว E_{cv}



เมื่อเวลา $t + dt$ มีมวลไหลออกระบบ δm_e โดยในระบบมีระดับพลังงานรวม

$$E_{cv} + dE_{cv}$$

รูปที่ 3-2 แสดงการไหลเข้าและออกของของไหลทำงานผ่านปริมาตรควบคุม

ตามกฎข้อที่หนึ่งของอุณหพลศาสตร์

จากกฎข้อที่หนึ่งของอุณหพลศาสตร์กับปริมาณควบคุมเมื่อเวลาผ่านไป dt

โดยที่

$$\begin{aligned}\delta Q &= \delta Q_{CV} \\ dE &= (E_{t+dt})_{system} - (E_t)_{system} \\ dE &= (E_{CV} + dE_{CV} + e_e \delta m_e) - (E_{CV} + e_i \delta m_i) \\ dE &= dE_{CV} + e_e \delta m_e - e_i \delta m_i \dots \dots \dots (3.2)\end{aligned}$$

สมการ 3.2 เป็นสมการการเปลี่ยนแปลงของระดับพลังงานสำหรับปริมาณควบคุมของอากาศที่ไหลผ่านอุปกรณ์

δW ประกอบด้วยงานที่ผ่านปริมาณควบคุมและงานเนื่องจากการเคลื่อนที่ของขอบเขตของระบบที่ทางเข้าและออกของปริมาณควบคุม

$$\begin{aligned}\delta W &= \delta W_{CV} - dW_i + dW_e \\ &= \delta W_{CV} - P_i dV_i + P_e dV_e\end{aligned}$$

ดังนั้นจะได้กฎข้อที่หนึ่งของอุณหพลศาสตร์กับปริมาณควบคุม

$$\delta Q = \delta Q_{CV} = dE_{CV} + e_e \delta m_e - e_i \delta m_i + \delta W_{CV} - P_i dV_i + P_e dV_e$$

จาก $e = u + e_k + e_p$ หรือ $e = u + \frac{v^2}{2} + gz$

$$\begin{aligned}\delta Q_{CV} &= dE_{CV} + (u_e + \frac{v_e^2}{2} + gz_e) \delta m_e - (u_i + \frac{v_i^2}{2} + gz_i) \delta m_i + \delta W_{CV} - P_i v_i \delta m_i + P_e v_e \delta m_e \\ \delta Q_{CV} + (u_i + \frac{v_i^2}{2} + gz_i + P_i v_i) \delta m_i &= dE_{CV} + (u_e + \frac{v_e^2}{2} + gz_e + P_e v_e) \delta m_e + \delta W_{CV} \dots \dots \dots (3.3)\end{aligned}$$

สมการ 3.3 เป็นสมการกฎข้อที่หนึ่งทางอุณหพลศาสตร์ของปริมาณควบคุม

ซึ่งจะใช้วิเคราะห์การอัดและการขยายตัวของอากาศในขบวนการต่างๆ

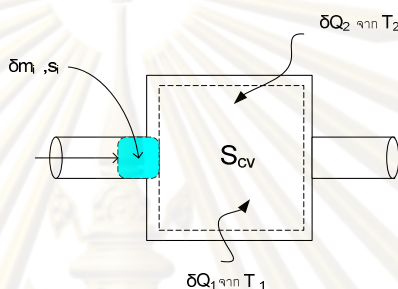
3.1.3 กฎข้อที่สองของอุณหพลศาสตร์สำหรับปริมาณควบคุม

จากกฎข้อที่สองทางอุณหพลศาสตร์

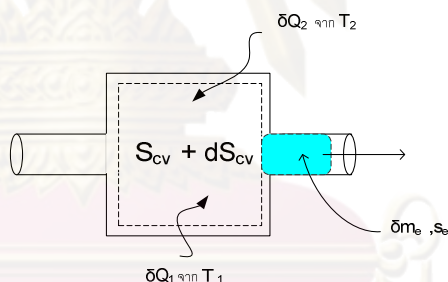
$$dS = \frac{\delta Q}{T} + dS_{gen}$$

เมื่อระบบที่สนใจเป็นปริมาตรควบคุมโดยมีการไหลเข้าออกของของไหลทำงานเท่ากับ δm_i และ δm_e และมีเอนโทรปีจำเพาะ s_i และ s_e ตามลำดับ โดยกำหนดให้เส้นไปลาแสดงขอบเขตของระบบ ซึ่งครอบคลุมมวลจำนวนเดียวกันในช่วงเวลา t ถึง $t + dt$ โดยมีการถ่ายเทความร้อนจากแหล่งความร้อนภายนอกกับปริมาตรควบคุม δQ_1 และ δQ_2 ณ บริเวณที่มีอุณหภูมิ T_1 และ T_2 ตามลำดับ

ซึ่งเป็นผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงเอนโทรปีของปริมาตรควบคุม dS ดังรูป



เมื่อเวลา t มีมวลไหลเข้าระบบ $\delta m_i, s_i$ และความร้อนถ่ายเท $\delta Q_1, \delta Q_2$ โดยในระบบมีเอนโทรปีอยู่แล้ว S_{cv}



เมื่อเวลา $t + dt$ มีมวลไหลออกระบบ $\delta m_e, s_e$ และความร้อนถ่ายเท $\delta Q_1, \delta Q_2$ โดยในระบบมีเอนโทรปีรวม $S_{cv} + dS_{cv}$

รูปที่ 3-3 แสดงการไหลเข้าและออกของของไหลทำงานผ่านปริมาตรควบคุมและการเปลี่ยนแปลงเอนโทรปีตามกฎข้อที่สองของอุณหพลศาสตร์

จากกฎข้อที่สองของอุณหพลศาสตร์กับปริมาตรควบคุมเมื่อเวลาผ่านไป dt

$$(S)_{t+dt} - (S)_t = \frac{\delta Q_1}{T_1} + \frac{\delta Q_2}{T_2} + dS_{gen}$$

$$(S_{cv} + dS_{cv} + s_e m_e) - (S_{cv} + s_i m_i) = \frac{\delta Q_1}{T_1} + \frac{\delta Q_2}{T_2} + dS_{gen}$$

$$dS_{cv} + s_e m_e - s_i m_i = \frac{\delta Q_1}{T_1} + \frac{\delta Q_2}{T_2} + dS_{gen} \dots \dots \dots (3.4)$$

โดยที่ $dS_{gen} \geq 0$ เสมอ ในกรณีที่ $dS_{gen} = 0$ อุปกรณ์ดังกล่าวจะสามารถย้อนกระบวนการกลับได้ (Reversible Process) ขบวนการที่เป็นขอบเขตความเป็นไปได้สูงสุดของอุปกรณ์ สมการ 3.4 เป็นสมการกฎข้อที่สองทางอุณหพลศาสตร์ของปริมาณควบคุม ซึ่งจะใช้วิเคราะห์การอัดและการขยายตัวของอากาศของอุปกรณ์ว่ามีความสมเหตุสมผลหรือไม่

3.1.4 กำลังงานของไหลในสถานะอยู่ตัวการไหล

จากสมการ 3.3 จะสามารถหางานที่ได้จากระบบดังนี้

$$\delta W_{CV} = \delta Q_{CV} + \left(u_i + \frac{v_i^2}{2} + gz_i + P_i v_i\right) \delta m_i - dE_{CV} - \left(u_e + \frac{v_e^2}{2} + gz_e + P_e v_e\right) \delta m_e$$

เมื่อพิจารณาต่อเวลาน้อยๆ (dt) จะได้กำลังจากระบบโดยมีความสัมพันธ์ทางอุณหพลศาสตร์ดังนี้

$$\dot{W}_{CV} = \dot{Q}_{CV} + \left(u_i + \frac{v_i^2}{2} + gz_i + P_i v_i\right) \dot{m}_i - \dot{E}_{CV} - \left(u_e + \frac{v_e^2}{2} + gz_e + P_e v_e\right) \dot{m}_e$$

พิจารณาในสถานะอยู่ตัวการไหล

ความเร็วและคุณสมบัติต่างๆของของไหลทำงาน ณ ตำแหน่งทางเข้า-ออกไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลา อัตราการไหลเข้าออกของมวลของสารทำงานมีค่าเท่ากัน $\dot{m}_i = \dot{m}_e = \dot{m}$

อัตราการถ่ายเทความร้อนเป็นค่าคงที่ $\dot{Q}_{CV} =$ ค่าคงที่

ไม่มีการสะสมหรือเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติต่างๆทางพลังงานภายในปริมาณควบคุม

จะสามารถลดรูปสมการเป็น

$$\begin{aligned} \dot{W}_{CV} &= \dot{Q}_{CV} + \left(u_i + \frac{v_i^2}{2} + gz_i + P_i v_i\right) \dot{m} - \left(u_e + \frac{v_e^2}{2} + gz_e + P_e v_e\right) \dot{m} \\ \dot{w}_{CV} &= \dot{q}_{CV} + \left(u_i + \frac{v_i^2}{2} + gz_i + P_i v_i\right) - \left(u_e + \frac{v_e^2}{2} + gz_e + P_e v_e\right) \dots\dots\dots(3.5) \end{aligned}$$

สมการ 3.5 เป็นสมการในการหากำลังงานต่ออัตราการไหลของสารทำงานที่เกิดจากสถานะอยู่ตัวการไหล

3.1.5 งานจากขบวนการขยายตัวของอากาศ(สารอัดได้เชิงเดียว)ด้วยขบวนการย้อนกลับได้

จากกฎข้อที่หนึ่งทางอุณหพลศาสตร์ของสารอัดได้เชิงเดียว

$$\delta Q = dE + \delta W$$

เมื่อไม่รวมการเปลี่ยนแปลงพลังงานจลน์และพลังงานศักย์ของขบวนการที่เกิดขึ้น

$$\delta Q = dU + \delta W$$

โดยที่ $\delta W = PdV$ และเมื่อพิจารณาต่อมวลของอากาศที่ไหลเข้า ออกปริมาตรควบคุมโดยเวลา เปลี่ยนแปลง dt สมการของขบวนการขยายตัวคือ

$$\dot{q} = \left(\frac{dU}{dt} + P \frac{dV}{dt} \right) \times \frac{1}{dm/dt} = d(u + Pv) - v.dP$$

ในกรณีที่ระบบอุปกรณ์ที่ออกแบบสามารถย้อนกลับได้ ($dS_{gen} = 0$) กล่าวคือ การถ่ายเทความร้อนของปริมาตรควบคุมคือการเปลี่ยนแปลงการถ่ายเทความร้อนของขบวนการเปลี่ยนแปลงของสารทำงานกับสิ่งแวดล้อมเท่านั้น

$$\dot{q} = \dot{q}_{CV}$$

$$q_{CV} = \int_i^e (d(u + Pv) - v.dP)$$

$$q_{CV} = -(u_i - u_e) - (P_i v_i - P_e v_e) - \int_i^e v.dP$$

จากสมการข้างต้นและสมการ 3.5 แสดงให้เห็นงานที่เกิดขึ้นจากขบวนการขยายตัวตั้งแต่ก๊าซเข้า อุปกรณ์จนกระทั่งออกจากอุปกรณ์ดังนี้

$$w_{CV} = -\int_i^e v.dP + \left(\frac{v_i}{2} + gz_i \right) - \left(\frac{v_e}{2} + gz_e \right)$$

เนื่องจากกระบวนการที่เกิดขึ้นเป็นกระบวนการย้อนกลับได้ของก๊าซสมบูรณ์ซึ่งจะพิจารณาขบวนการทางอุดมคติ 3 แบบดังนี้

- 1 . ขบวนการขยายตัวแบบอุณหภูมิคงที่ (Isothermal process)
- 2 . ขบวนการขยายตัวแบบไม่มีการถ่ายเทความร้อน (Isentropic process)
- 3 . ขบวนการขยายตัวแบบมีการถ่ายเทความร้อน (Polytropic process)

3.1.5.1 ขบวนการขยายตัวแบบอุณหภูมิคงที่ (Isothermal process)

ความสัมพันธ์ของขบวนการขยายตัวของอากาศเป็นดังนี้

$$P_1 V_1 = P_2 V_2 = \text{ค่าคงที่} = C \quad (\text{ในขณะที่ยขยายตัวอุณหภูมิคงที่})$$

ดังนั้นงานที่เกิดขึ้นจากอุปกรณ์โดยขบวนการขยายตัวแบบอุณหภูมิคงที่ คือ

$$w_{CV} = -\int_i^e \frac{C}{P} dP + \left(\frac{v_i}{2} + gz_i \right) - \left(\frac{v_e}{2} + gz_e \right)$$

$$w_{CV} = P_i v_i \cdot \ln \left(\frac{P_i}{P_e} \right) + \left(\frac{v_i}{2} + gz_i \right) - \left(\frac{v_e}{2} + gz_e \right) \dots \dots \dots (3.6)$$

สมการ 3.6 ใช้หาขอบเขตความเป็นไปได้สูงสุดที่จะได้งานจากอุปกรณ์ที่ออกแบบ

3.1.5.2 ขบวนการขยายตัวแบบไม่มีการถ่ายเทความร้อนและเอนโทรปีไม่เปลี่ยนแปลง

(Isentropic process) ความสัมพันธ์ของขบวนการขยายตัวของอากาศเป็นดังนี้

$$P_1 V_1^K = P_2 V_2^K = \text{ค่าคงที่} = C \quad (K=1.4)$$

(ในขณะที่ขยายตัวอุณหภูมิมีความสัมพันธ์กับความดันและปริมาตรดังนี้)

$$\frac{P_1 V_1}{T_1} = \frac{P_2 V_2}{T_2}$$

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{V_2}{V_1}\right)^{(1-K)} = \left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{\left(\frac{K-1}{K}\right)}$$

ดังนั้นงานที่เกิดขึ้นจากอุปกรณ์โดยขบวนการขยายตัวแบบไม่มีการถ่ายเทความร้อน คือ

$$w_{CV} = -\int_i^e \left(\frac{C}{P}\right)^{\frac{1}{K}} dP + \left(\frac{v_i}{2} + gz_i\right) - \left(\frac{v_e}{2} + gz_e\right)$$

$$w_{CV} = \frac{K}{K-1} (P_i v_i - P_e v_e) + \left(\frac{v_i}{2} + gz_i\right) - \left(\frac{v_e}{2} + gz_e\right) \dots \dots \dots (3.7)$$

สมการ 3.7 ใช้หาขอบเขตความเป็นไปได้สูงสุดที่จะได้งานจากอุปกรณ์ที่ออกแบบโดยไม่มีการถ่ายเทความร้อนใดๆระหว่างระบบกับสิ่งแวดล้อม และขบวนการสามารถย้อนกลับได้ ($ds = 0$)

3.1.5.3 ขบวนการขยายตัวแบบมีการถ่ายเทความร้อน (Polytropic process)

ความสัมพันธ์ของขบวนการขยายตัวของอากาศเป็นดังนี้

$$P_1 V_1^n = P_2 V_2^n = \text{ค่าคงที่} = C \quad (1 < n < \infty)$$

(ในขณะที่ขยายตัวอุณหภูมิมีความสัมพันธ์กับความดันและปริมาตรดังนี้)

$$\frac{P_1 V_1}{T_1} = \frac{P_2 V_2}{T_2}$$

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{V_2}{V_1}\right)^{(1-n)} = \left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{\left(\frac{n-1}{n}\right)}$$

ดังนั้นงานที่เกิดขึ้นจากอุปกรณ์โดยขบวนการขยายตัวแบบอุณหภูมิคงที่ คือ

$$w_{CV} = -\int_i^e \left(\frac{C}{P}\right)^{\frac{1}{n}} dP + \left(\frac{v_i}{2} + gz_i\right) - \left(\frac{v_e}{2} + gz_e\right)$$

$$w_{CV} = \frac{n}{n-1} (P_i v_i - P_e v_e) + \left(\frac{v_i}{2} + gz_i\right) - \left(\frac{v_e}{2} + gz_e\right) \dots \dots \dots (3.8)$$

สมการ 3.8 ใช้หาขอบเขตความเป็นไปได้สูงสุดที่จะได้งานจากอุปกรณ์ที่ออกแบบโดยมีการถ่ายเทความร้อนใดๆระหว่างระบบกับสิ่งแวดล้อม ($dS > 0$)

3.1.6 งานจากขบวนการขยายตัวของอากาศ(สารอัดได้เชิงเดี่ยว)ด้วยขบวนการย้อนกลับได้แบบขยายตัว 2 ชั้น

เมื่อการเก็บกักอากาศที่ใช้ในการขยายตัวมีความดันสูงดังนั้นการใช้พลังงานจากของไหลทำงานให้มีประสิทธิภาพโดยผ่านขบวนการเอนทัลปีคงที่ ในขณะที่ความดันลดลงจะต้องเกิดขึ้นน้อยที่สุดเพราะจะทำให้สารทำงานมีอุณหภูมิต่ำลงและเกิดเอนโทรปีสูญเสียดังนั้นต้องทำการขยายตัวของสารทำงานที่ความดันสูงเท่าที่จะทำได้ จากสมการ 3.8 พิจารณาการขยายตัว 2 ชั้น ดังนี้

$$W_{\Delta S \rightarrow 0} = \frac{n}{n-1} RT_1 \left[\left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{n-1}{n}} - 1 \right] + \frac{n}{n-1} RT_1 \left[\left(\frac{P_3}{P_2} \right)^{\frac{n-1}{n}} - 1 \right] \dots \dots \dots (3.9)$$

สมการ 3.9 ใช้ในการหางานสูงสุดที่เกิดจากการขยายตัวสองชั้น โดยขบวนการ Polytropic

$$(1 < n < \infty)$$

โดยให้ T_1 คือ อุณหภูมิบรรยากาศ (K)

P_1 คือ ความดันอากาศก่อนการขยายตัวขั้นแรก(Pa)

P_2 คือ ความดันอากาศภายหลังการขยายตัวขั้นแรก(Pa)

P_3 คือ ความดันอากาศภายหลังการขยายตัวขั้นที่สอง(Pa)

R คือ...ค่าคงที่ของก๊าซ (Air -0.287KJ/Kg.K, Nitrogen-0.296KJ/Kg.K)

สมการ 3.9 จาก เมื่อกำหนดค่างานมากที่สุดเทียบกับสัดส่วนความดันเป็นดังต่อไปนี้

$$\frac{dW_{\Delta S \rightarrow 0}}{dP_2} = \frac{n}{n-1} \left(\frac{n-1}{n} \right) RT_1 \left[\left(\frac{1}{P_1} \right)^{\frac{n-1}{n}} (P_2)^{-\frac{1}{n}} \right] + \frac{n}{n-1} \cdot - \left(\frac{n-1}{n} \right) RT_1 \left[\left(\frac{1}{P_3} \right)^{\frac{-n+1}{n}} (P_2)^{-\frac{2n+1}{n}} \right] = 0$$

โดยที่ $P_2 = \sqrt{P_1 \cdot P_3}$ จะเป็นความดันขั้นที่สองที่เหมาะสมที่สุดในการขยายตัวขั้นที่สอง ซึ่งจะได้งานในขบวนการขยายตัวมากที่สุดด้วย

3.2 การวิเคราะห์การขยายตัวของอากาศภายในระบบผ่านใบพัดเลื่อน (Sliding vane) และประสิทธิภาพการขยายตัวของอากาศอัดแบบ 2 ชั้นของเครื่องยนต์ที่ออกแบบ

กำหนด เงื่อนไขการคำนวณเพื่อการออกแบบ

ความดันชั้นแรกก่อนการขยายตัวเท่ากับ	25 Bar (อุณหภูมิ 303 K)
ความดันชั้นที่สอง เท่ากับ	5 Bar
ความดันภายหลังการขยายตัว	1 Bar

3.2.1 ในกรณีการขยายตัวเป็นแบบอุณหภูมิคงที่แบบย้อนกลับได้ (Reversible-Isothermal)

งานที่ได้จากเครื่องยนต์ เมื่อไม่นำพลังงานศักย์และพลังงานจลน์ของการไหลมาคำนวณ

$$P_1 = 2.5 \text{ MPa}, v_1 = 0.0328 \text{ m}^3 / \text{Kg}$$

$$P_2 = 0.5 \text{ MPa}, v_2 = 0.1639 \text{ m}^3 / \text{Kg}$$

$$P_3 = 0.1 \text{ MPa}, v_3 = 0.8197 \text{ m}^3 / \text{Kg}$$

$$w_{CV} = P_1 v_1 \cdot \ln\left(\frac{P_1}{P_2}\right) + P_2 v_2 \cdot \ln\left(\frac{P_2}{P_3}\right)$$

เนื่องจากเป็นขบวนการอุณหภูมิคงที่ ดังนั้น $P_1 v_1 = P_2 v_2$

$$w_{CV} = 2.5 \text{ M} * 0.0328 \cdot \left[\ln\left(\frac{2.5}{0.5}\right) + \ln\left(\frac{0.5}{0.1}\right) \right] = 263,947.82 \text{ J} / \text{Kg}$$

$$T_1 = T_2 = T_3 = 303 \text{ K}$$

3.2.2 ในกรณีการขยายตัวเป็นแบบไม่มีการถ่ายเทความร้อนย้อนกลับได้ (Isentropic)

งานที่ได้จากเครื่องยนต์ เมื่อไม่นำพลังงานศักย์และพลังงานจลน์ของการไหลมาคำนวณ

เนื่องจากเป็นขบวนการเอนโทรปีคงที่ ดังนั้น $P_1 (v_1)^K = P_2 (v_2)^K = \text{constant}$

$$K = 1.4$$

$$P_1 = 2.5 \text{ MPa}, v_1 = 0.0328 \text{ m}^3 / \text{Kg}$$

$$P_2 = 0.5 \text{ MPa}, v_2 = 0.104 \text{ m}^3 / \text{Kg} \rightarrow \text{addHeat} \rightarrow P_2^* = 0.5 \text{ MPa}, v_2^* = 0.164 \text{ m}^3 / \text{Kg}$$

$$P_3 = 0.1 \text{ MPa}, v_3 = 0.518 \text{ m}^3 / \text{Kg}$$

$$w_{CV} = \frac{K}{K-1} (P_1 v_1 - P_2 v_2) + \frac{K}{K-1} (P_2^* v_2^* - P_3 v_3)$$

$$w_{CV} = \frac{1.4}{0.4} ((2.5 \text{ M} \times 0.0328) - (0.5 \text{ M} \times 0.104)) + \frac{1.4}{0.4} ((0.5 \text{ M} \times 0.164) - (0.1 \text{ M} \times 0.518))$$

$$w_{CV} = 210,700 \text{ J} / \text{Kg}$$

พิจารณาอุณหภูมิแต่ละชั้นการขยายตัว

จากความสัมพันธ์ ดังนี้

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{V_2}{V_1}\right)^{(1-K)} \rightarrow \frac{T_2}{303} = \left(\frac{0.104}{0.0328}\right)^{(1-1.4)} \rightarrow T_2 = 191K$$

อากาศผ่านอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนหรือเกิดการถ่ายเทความร้อนจากบรรยากาศ

$$T_2 \rightarrow \text{addheat} \rightarrow T_2^* = 303K, \frac{T_3}{T_2^*} = \left(\frac{V_3}{V_2^*}\right)^{(1-K)} \rightarrow \frac{T_3}{303} = \left(\frac{0.518}{0.164}\right)^{(1-1.4)} \rightarrow T_3 = 191K$$

$$T_1 = 303K, T_2 = 191K, T_2^* = 303K, T_3 = 191K$$

3.2.3 ในกรณีการขยายตัวเป็นแบบมีการถ่ายเทความร้อนย้อนกลับได้ (Polytropic)

งานที่ได้จากเครื่องยนต์ เมื่อนำพลังงานศักย์และพลังงานจลน์ของการไหลมาคำนวณ เนื่องจากเป็นขบวนการที่ความร้อนสามารถถ่ายเทเข้ามาในระบบได้ ดังนั้น

$$P_1(v_1)^n = P_2(v_2)^n = \text{constant}$$

สมมติ $n = 1.3$

$$P_1 = 2.5MPa, v_1 = 0.0328m^3 / Kg$$

$$P_2 = 0.5MPa, v_2 = 0.113m^3 / Kg \rightarrow \text{addHeat} \rightarrow P_2^* = 0.5MPa, v_2^* = 0.164m^3 / Kg$$

$$P_3 = 0.1MPa, v_3 = 0.566m^3 / Kg$$

$$w_{CV} = \frac{n}{n-1}(P_1v_1 - P_2v_2) + \frac{n}{n-1}(P_2^*v_2^* - P_3v_3)$$

$$w_{CV} = \frac{1.3}{0.3}((2.5M \times 0.0328) - (0.5M \times 0.113)) + \frac{1.3}{0.3}((0.5M \times 0.164) - (0.1M \times 0.566))$$

$$w_{CV} = 220,567J / Kg$$

พิจารณาอุณหภูมิแต่ละขั้นการขยายตัว

จากความสัมพันธ์ ดังนี้

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{V_2}{V_1}\right)^{(1-n)} \rightarrow \frac{T_2}{303} = \left(\frac{0.113}{0.0328}\right)^{(1-1.3)} \rightarrow T_2 = 209K$$

อากาศผ่านอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนจนมีอุณหภูมิเท่าบรรยากาศ

$$T_2 \rightarrow \text{addheat} \rightarrow T_2^* = 303K, \frac{T_3}{T_2^*} = \left(\frac{V_3}{V_2^*}\right)^{(1-n)} \rightarrow \frac{T_3}{303} = \left(\frac{0.566}{0.164}\right)^{(1-1.3)} \rightarrow T_3 = 209K$$

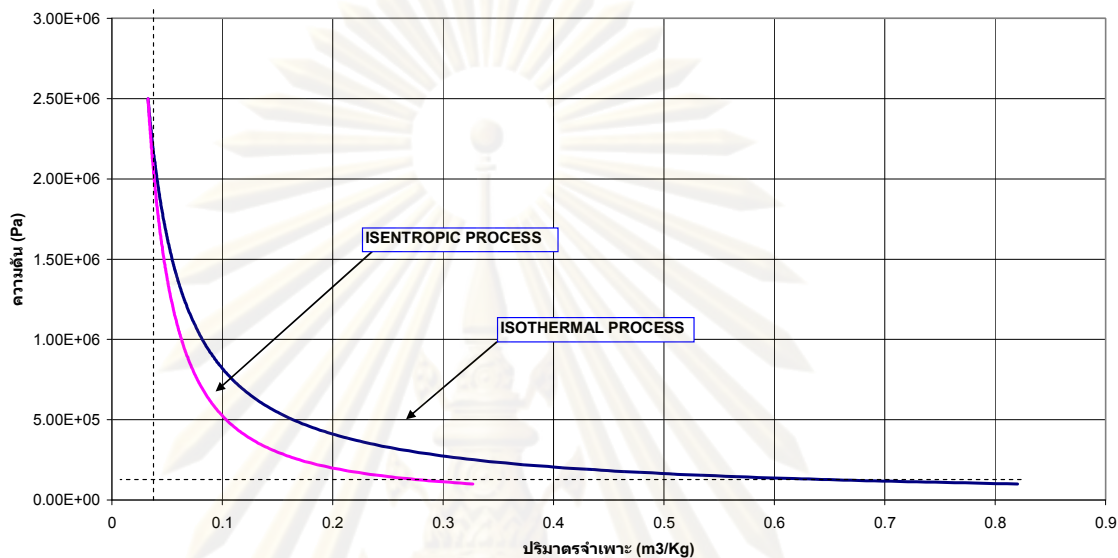
$$T_1 = 303K, T_2 = 209K, T_2^* = 303K, T_3 = 209K$$

ประสิทธิภาพของขบวนการขยายตัวเมื่อเทียบกับขบวนการอุณหภูมิคงที่

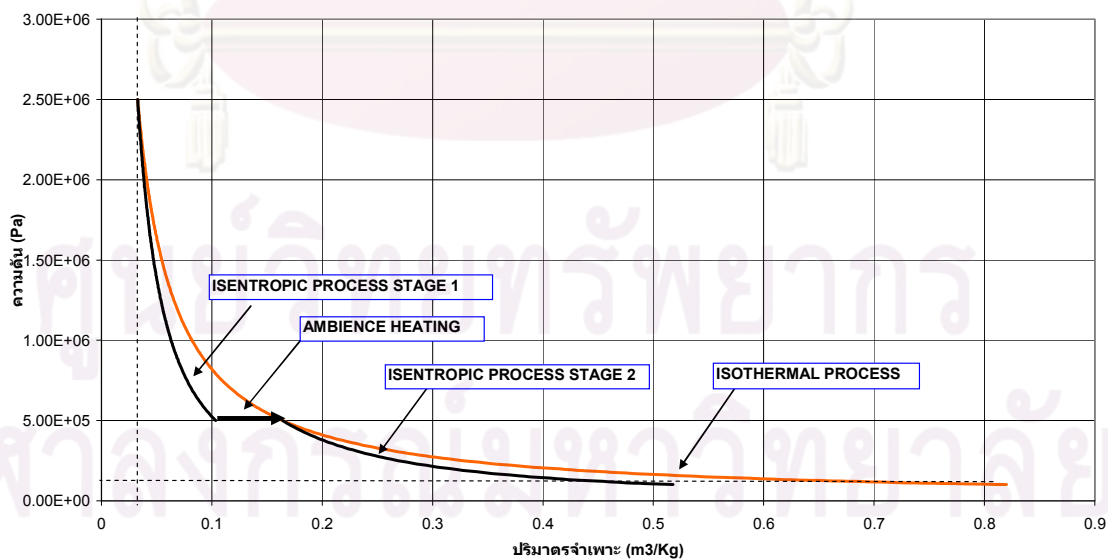
$$\text{ขบวนการ Isentropic} = \frac{210,700}{263,947} = 79.8 \%$$

$$\text{ขบวนการ Polytropic}\{n=1.3\} = \frac{220,567}{263,947} = 83.6 \%$$

อย่างไรก็ตามขบวนการที่ได้จากการคำนวณยังไม่ได้รวมการสูญเสียพลังงานทางกลและการย้อนกลับไม่ได้ของขบวนการขยายตัวของอากาศ ($S_{gen} > 0$)

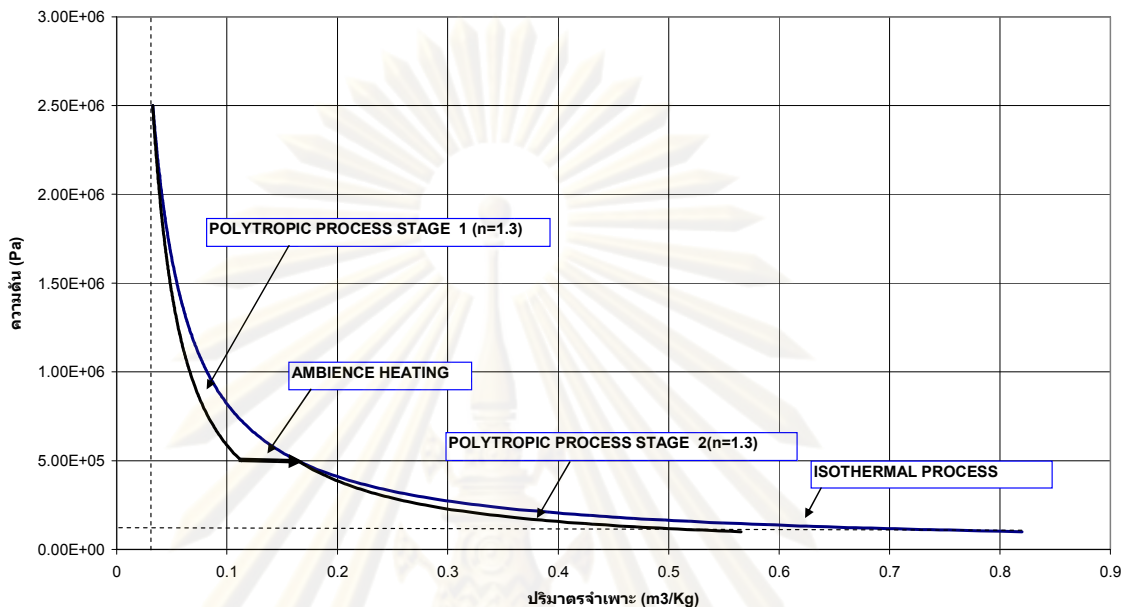


รูปที่ 3-4 ความสัมพันธ์ระหว่างความดันและปริมาตรจำเพาะของขบวนการขยายตัวเชิงเดี่ยว (25Bar-1Bar)



รูปที่ 3-5 ความสัมพันธ์ระหว่างความดันและปริมาตรจำเพาะของขบวนการขยายตัว 2 ขั้นตอน

แบบ Isentropic (25Bar-5Bar-1Bar)



รูปที่ 3-6 ความสัมพันธ์ระหว่างความดันและปริมาตรจำเพาะของขบวนการขยายตัว 2 ขั้นตอนแบบ Polytropic {n=1.3} (25Bar-5Bar-1Bar)

3.2.4 ความเป็นไปได้ของระบบที่ออกแบบ

เนื่องจากการทดลองจะใช้แหล่งอากาศความดันสูง 140 Bar ปริมาตร 48 ลิตร สมมุติอุณหภูมิบรรยากาศเท่ากับ 303 K (พิจารณาเป็นก๊าซสมบูรณ์)

$$P \cdot v = RT \rightarrow v = \frac{RT}{P} = \frac{287 \cdot (303)}{14M} = 0.00621 \frac{m^3}{Kg}$$

เมื่อปริมาตรของถังเก็บอากาศความดันสูงคงที่มีค่าเท่ากับ $0.048 m^3$

ดังนั้นมวลของอากาศที่สถานะนี้มีค่าเท่ากับ 7.73 Kg

ด้วยมวลของอากาศจำนวนดังกล่าวในกรณีที่เกิดการขยายตัวแบบ Polytropic {n=1.3}

จากอากาศที่ความดัน 25 บรรยากาศ ผู้ความดันบรรยากาศ พลังงานที่ได้จากอากาศสูงสุดจะมีค่าเท่ากับ $7.73 \times 220567 = 1,704,982.91 J$

สมมุติประสิทธิภาพทางกลของระบบมีค่า 50 %

และสมมุติภาระทางกลเท่ากับ 300 W

ด้วยสมมุติฐานนี้จะสามารถทดสอบเครื่องยนต์ที่ออกแบบด้วยกำลังงาน 300 W เป็นเวลา

$$\frac{1,704,982.91 \times 0.5}{300} = 2842 \text{ วินาที (-ประมาณ 47 นาที-)}$$

หรือ สมมติภาระทางกลเท่ากับ 500 W

ด้วยสมมติฐานนี้จะสามารถรันเครื่องยนต์ที่ออกแบบด้วยกำลังงาน 500 W เป็นเวลา

$$\frac{1,704,982.91 \times 0.5}{500} = 1705 \text{ วินาที (-ประมาณ 28 นาที-)}$$

อย่างไรก็ตามกำลังงานทางกลและประสิทธิภาพของเครื่องยนต์จริงจะต้องได้จากการทดลอง

3.3 ทฤษฎีเบื้องต้นของการไหลแบบอัดตัวได้

สถานะการไหลที่สามารถบีบอัดได้สามารถเปลี่ยนแปลงคุณลักษณะของการไหลเมื่อพื้นที่หน้าตัดขวางการไหลเปลี่ยน, ความเสียดทาน, การถ่ายเทความร้อนและคลื่นกระแทก (Normal shock wave) ซึ่งจะต้องอธิบายปรากฏการณ์ในเชิง 3 มิติ ที่มีความสลับซับซ้อนดังนั้นการอธิบายเพื่อให้เห็นลักษณะของปรากฏการณ์และลดความซับซ้อนลง จะอธิบายเฉพาะการไหลอยู่ตัวของไหลอัดตัวได้เชิงเดียวแบบ 1 มิติ แบบไม่มีการถ่ายเทความร้อนและสามารถย้อนขบวนการกลับได้ (Isentropic flow for an ideal gas)

3.3.1 ความเร็วเสียง (Speed of sound)

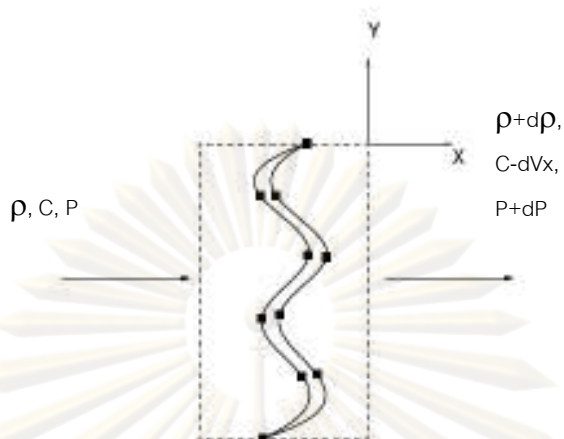
โดยทั่วไปการอ้างอิงความเร็วของของไหลที่สามารถบีบอัดได้จะแบ่งหรือเทียบเคียงกับความเร็วเสียง ดังนั้นความเร็วเสียงจึงเป็นคุณลักษณะที่สำคัญในการอ้างอิงการเคลื่อนที่ของของไหล ณ.สถานะที่สนใจ โดยสามารถอธิบายเป็นตัวแปรไร้มิติ (Dimensionless parameter) ที่เรียกว่า มัคนัมเบอร์

$$M = \frac{V}{C}$$

โดยที่ M= มัคนัมเบอร์ (Mach number)

V=ความเร็วของของไหล (velocity of fluid) (m/s)

C= ความเร็วเสียง (velocity of sound at state) (m/s)



รูปที่ 3-7สถานะของการไหลปริมาตรควบคุมเคลื่อนไปพร้อมกับคลื่นกระแทก

ณ.ความเร็วเสียง

จากรูปที่ 3-7 ความเร็วเสียงจะเกิดจากการเปลี่ยนแปลงความดันและความหนาแน่นของตัวกลางของไหลเป็นคลื่นขนาดเล็กมาก โดยส่งต่อการเปลี่ยนแปลงไปยังตัวกลางก่อนคลื่นเคลื่อนที่ไปถึง ซึ่งเป็นสภาวะไร้การเปลี่ยนแปลง โดยคลื่นที่เคลื่อนที่ผ่านตัวกลางนี้จะมีความเร็วเท่ากับเสียง จากตำแหน่งของผู้สังเกตการณ์ภายนอกบนแกนที่ไม่เคลื่อนที่ตามคลื่นเสียงกับเคลื่อนที่ตามคลื่นสมการอยู่ตัวการไหล (Continuity Equation)

$$dV_x = \frac{c}{\rho} d\rho$$

สมการ โมเมนตัม

$$-Adp = -\rho c AdV_x$$

$$dV_x = \frac{1}{\rho c} dp$$

จากสมการการไหลอยู่ตัวและสมการโมเมนตัม

$$\frac{c}{\rho} d\rho = \frac{1}{\rho c} dp$$

$$c^2 = \frac{dp}{d\rho}$$

เนื่องจากคลื่นเล็กมาก ๆ และเวลาน้อยมาก ๆ สำหรับการถ่ายเทความร้อนจากสมมุติฐานทำให้อนุมานได้ว่า

$$c = \sqrt{\frac{\partial P}{\partial \rho}} \dots \dots \dots (3.10)$$

สมการ 3.10 สำหรับก๊าซในอุดมคติความสัมพันธ์ระหว่างความดันและความหนาแน่นในการไหลแบบไม่มีการถ่ายเทความร้อนและสามารถย้อนขบวนการกลับได้

Isentropic คือ $\frac{p}{\rho^k} = \text{ค่าคงที่}$

$$\ln(p) - k \cdot \ln(\rho) = \text{ค่าคงที่}$$

$$\frac{1}{p} dp - \frac{k}{\rho} d\rho = 0$$

$$\frac{dp}{d\rho_s} = \frac{kp}{\rho}$$

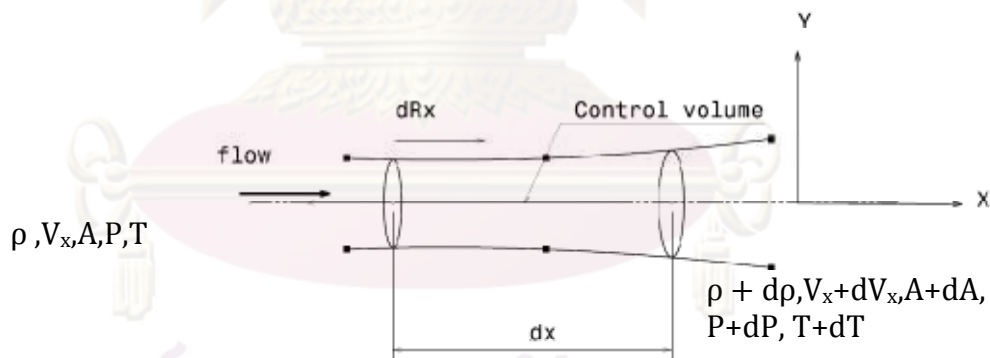
จากสมการความเร็วเสียงและสมการสถานะของก๊าซ

$$c = \sqrt{\frac{kp}{\rho}} = \sqrt{kRT} \dots \dots \dots (3.11)$$

สมการ 3.11 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วเสียงกับอุณหภูมิของก๊าซ

เมื่อพิจารณาการอ้างอิงความเร็วของของไหลที่สามารถบีบอัดตัวได้แล้ว จะพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างสถานะของไหลที่จุดอ้างอิงและจุดที่สนใจได้ดังนี้ โดยมีสมมุติฐานดังนี้

- 1 การไหลเป็นการไหลแบบอยู่ตัว
- 2 การไหลเป็นรูปแบบเดียวกันตลอดการไหล
- 3 ละการคิณน้ำหนัของของไหลภายในปริมาตรควบคุม
- 4 ละการคิณแรงเนื่องจากความเร่งของของไหลภายในปริมาตรควบคุม
- 5 ละการพิจารณาแรงเสียดทานภายในการไหล



รูปที่ 3-8 การไหลของของไหลที่อัดตัวได้ในท่อเล็ก

1 สมการความต่อเนื่อง (Continuity Equation)

$$\rho V_x \cdot A = (\rho + dp)(V_x + dV_x)(A + dA)$$

2 สมการโมเมนตัม (Momentum Equation)

จากแรงที่กระทำที่ผิวต่อกระทำต่อของไหล

$$F_{sx} = dR_x + PA - (P + dP)(A + dA)$$

เนื่องจากแรง dR_x เกิดขึ้นตามขอบเขตของกระแสการไหลซึ่งสมมุติให้แรงนี้คือแรงที่กระทำให้
ความดันลดลงเปลี่ยนแปลงไปเท่ากับ $\frac{dP}{2}$ ตลอดช่วงการไหลผ่านพื้นที่หน้าตัดต่อ dA
ดังนั้น

$$dR_x = \left(P + \frac{dP}{2} \right) dA$$

ซึ่งจะได้ว่า

$$F_{sx} = PdA + \frac{dPdA}{2} + PA - PA - dPA - PdA - dPdA$$

$$F_{sx} = -dP \cdot A$$

อัตราการเปลี่ยนแปลงโมเมนตัมคือ

$$V_x \{-\rho V_x A\} + (V_x + dV_x) \{(\rho + d\rho)(V_x + dV_x)(A + dA)\}$$

ดังนั้น

$$-dP \cdot A = (\rho V_x A) dV_x = -\rho d \left(\frac{V_x^2}{2} \right)$$

$$\frac{dP}{\rho} + d \left(\frac{V_x^2}{2} \right) = 0$$

สำหรับก๊าซในอุดมคติความสัมพันธ์ระหว่างความดันและความหนาแน่นในการไหลแบบไม่มีการ
ถ่ายเทความร้อนและสามารถย้อนขบวนการกลับได้ Isentropic คือ $\frac{P}{\rho^k} = \text{ค่าคงที่} = C$

$$\frac{1}{\rho} = P^{-\frac{1}{k}} C^{\frac{1}{k}}$$

จากสมการ โมเมนตัม

$$-d \left(\frac{V_x^2}{2} \right) = \frac{dP}{\rho} = P^{-\frac{1}{k}} C^{\frac{1}{k}} dP$$

อินทิเกรตสมการจากของไหลมีความเร็ว V_x ถึง 0 และความดันจาก P ถึง P_0 ดังนี้

$$-\int_{V_x}^0 d \left(\frac{V^2}{2} \right) = C^{\frac{1}{k}} \int_P^{P_0} P^{-\frac{1}{k}} dP$$

$$\frac{V^2}{2} = C^{\frac{1}{k}} \cdot \frac{k}{k-1} \cdot P^{\frac{(k-1)}{k}} \left[\left(\frac{P_0}{P} \right)^{\frac{(k-1)}{k}} - 1 \right]$$

$$\frac{V^2}{2} = \frac{k}{k-1} \cdot \frac{P}{\rho} \cdot \left[\left(\frac{P_0}{P} \right)^{\frac{(k-1)}{k}} - 1 \right]$$

$$\left(\frac{P_0}{P} \right)^{\frac{(k-1)}{k}} = 1 + \frac{k-1}{k} \frac{\rho V^2}{P}$$

สำหรับก๊าซอุดมคติ

$$\frac{P}{\rho} = RT$$

ดังนั้น

$$\left(\frac{P_o}{P}\right) = \left[1 + \frac{k-1}{2} \frac{V^2}{kRT}\right]^{\frac{k}{k-1}}$$

จากสมการ 3.11

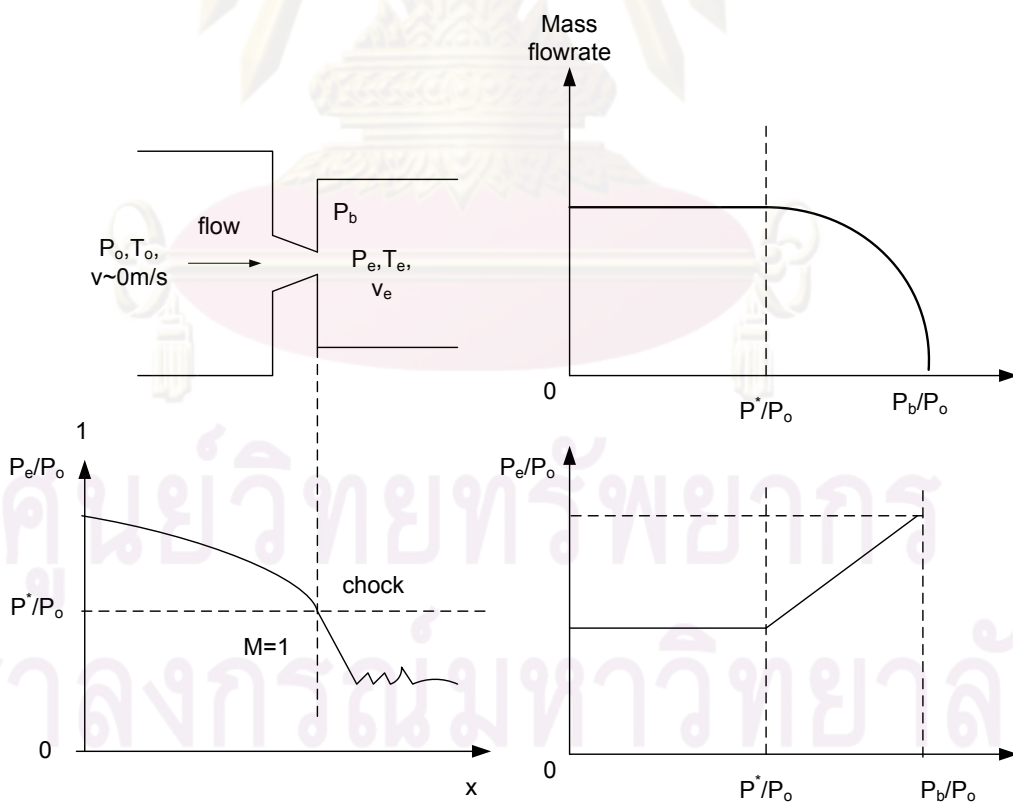
$$\left(\frac{P_o}{P}\right) = \left[1 + \frac{k-1}{2} \frac{V^2}{C^2}\right]^{\frac{k}{k-1}} = \left[1 + \frac{k-1}{2} M^2\right]^{\frac{k}{k-1}}$$

จากความสัมพันธ์นี้ทำให้สามารถคำนวณสถานะของของไหลที่ตำแหน่งที่สนใจกับของของไหลในสถานะนิ่งได้ดังนี้

$$\begin{aligned} \left(\frac{P_o}{P}\right) &= \left[1 + \frac{k-1}{2} M^2\right]^{\frac{k}{k-1}} \\ \left(\frac{T_o}{T}\right) &= \left[1 + \frac{k-1}{2} M^2\right] \\ \left(\frac{\rho_o}{\rho}\right) &= \left[1 + \frac{k-1}{2} M^2\right]^{\frac{1}{k-1}} \dots\dots\dots(3.12) \end{aligned}$$

สมการ 3.12 ความสัมพันธ์ของสถานะของไหลระหว่างสถานะหยุดนิ่ง (stagnation) กับสภาวะทดลองที่ความเร็วการไหลต่างๆ

3.3.2 การไหลผ่านช่องเล็กแบบ Isentropic Process



รูปที่ 3-9 การไหลของของไหลที่บีบอัดตัวได้แบบ Isentropic Process ผ่านช่องเล็ก

ความดันส่งกลับ (Back pressure) ของการไหลผ่านช่องเล็กสามารถควบคุมได้โดยการเปลี่ยนพื้นที่หน้าตัดที่เล็กที่สุด (throat) และอุณหภูมิ, ความดันของแหล่งจ่ายอย่างไรก็ตามจากกราฟจะเห็นว่าความเร็วสูงสุดที่ของไหลจะเคลื่อนที่ได้เมื่อผ่านช่องเล็กคือความเร็วเสียงในสถานะนั้น ที่จะเกิดขึ้นที่คอของช่องเล็กดังนั้นจะได้ความดันวิกฤตที่เกิดขึ้นจากสมการ 3.12 ดังนี้

$$\left(\frac{P_0}{P}\right) = \left[1 + \frac{k-1}{2} M^2\right]^{\frac{k}{k-1}} \quad \text{เมื่อ } M = 1$$

$$\left(\frac{P^*}{P_0}\right) = \left[\frac{2}{k+1}\right]^{\frac{k}{k-1}}$$

สำหรับอากาศ k=1.4

$$\left(\frac{P^*}{P_0}\right) = 0.528$$

จากความสัมพันธ์นี้ จะเห็นว่าเมื่อความดันที่แหล่งจ่ายและความดันไหลออกมีค่าต่างกัน $\left(\frac{1}{0.528}\right) = 1.894$ เท่า ความเร็วของของไหลจะถึงจุดความเร็วเสียง ดังนั้นเมื่อความดันส่งกลับมีค่าน้อยกว่าความดันจุดวิกฤตของช่องเล็กการไหลนี้จะเกิดปรากฏการณ์ที่เรียกว่า Chock flow ซึ่งจะส่งผลให้เอนโทรปีเพิ่มขึ้นและการไหลจะไม่เป็น isentropic อีกภายหลังผ่านพื้นที่หน้าตัดที่เล็กที่สุดจากการไหลจาก

$$\dot{m} = A \rho^* V^*$$

และ

$$\frac{\rho^*}{\rho_0} = \left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{1}{k-1}}$$

$$V^* = \sqrt{kRT^*} = \sqrt{kR\left(\frac{2}{k+1}\right)T_0}$$

ดังนั้น

$$\dot{m} = A \left(\frac{2}{k+1}\right)^{\left(\frac{1}{k-1}\right)} \rho_0 \sqrt{kR\left(\frac{2}{k+1}\right)T_0}$$

$$\dot{m} = AP_0 \sqrt{\frac{k}{ZRT_0} \left(\frac{2}{k-1}\right)^{\left(\frac{k+1}{k-1}\right)}}$$

$$\dot{m} = CAP_0 \sqrt{\frac{k}{ZRT_0} \left(\frac{2}{k-1}\right)^{\left(\frac{k+1}{k-1}\right)}} \dots\dots\dots(3.13)$$

สมการ 3.13 ความสัมพันธ์ระหว่างสถานะของก๊าซและพื้นที่หน้าตัดการไหลต่ออัตราการไหล

เมื่อ $C = 0.72$ สำหรับช่องเล็ก [13]

โดยที่ $P_0 =$ ความดันของก๊าซภายในถังความดันสูง

$T_0 =$ อุณหภูมิของก๊าซภายในถังความดันสูง

ρ_o = ความหนาแน่นของก๊าซภายในถังความดันสูง

M = มัคนัมเบอร์

\dot{m} = อัตราการไหลของมวล

ρ^* = ความหนาแน่นของก๊าซ ณ.พื้นที่หน้าตัดที่เกิด Chock flow

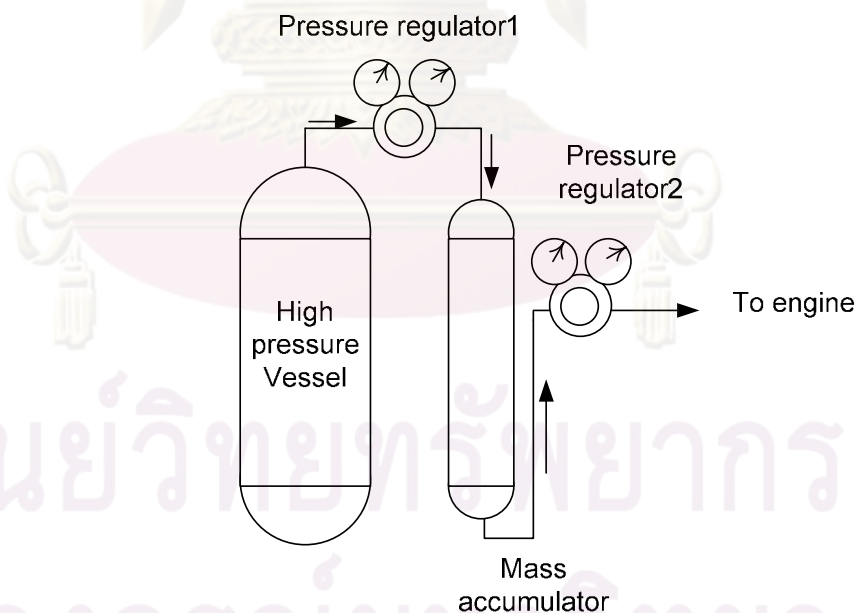
V^* = ความเร็วของก๊าซ ณ.พื้นที่หน้าตัดที่เกิด Chock flow

A = พื้นที่หน้าตัดของการไหลที่เกิด Chock flow

Z = สัมประสิทธิ์การบีบอัดของก๊าซ (~ 1)

จากการพิจารณาจะเห็นว่า $\dot{m} \propto A, \dot{m} \propto \frac{P_o}{\sqrt{T_o}}$ เนื่องจากการควบคุมมวลให้ไหลอย่างต่อเนื่องจำเป็นต้องควบคุม P_o และ T_o ให้คงที่ตลอดการไหล โดยมวลที่ไหลสามารถควบคุมโดยกำหนดพื้นที่หน้าตัดที่ไหลผ่านได้

อย่างไรก็ตามการใช้แหล่งของไหลที่บีบอัดภายในถังความดันซึ่งลดลงตลอดการไหลทำให้ไม่สามารถควบคุมมวลที่ไหลให้คงที่ได้ ดังนั้นจำเป็นต้องออกแบบให้มีการไหลของมวลมาสะสมภายในถังความดันอีกใบหนึ่งเพื่อให้เกิดการไหลมาสะสมก่อนแล้วจึงปล่อยสู่อุปกรณ์ขยายตัวต่อไปดังรูป



รูปที่ 3-10 ผังอุปกรณ์ที่ใช้ในการควบคุมอัตราการไหลของก๊าซให้คงที่

โดยพื้นที่หน้าตัดการไหลของ Pressure regulator 1 จะมีขนาดใหญ่กว่า Pressure regulator 2 และการปรับความดันจากถังความดันสูง High pressure vessel สู่ Mass accumulator จะปรับค่าให้มากกว่าความดันใช้งานประมาณ 5 บรรยากาศ เพื่อให้คงอัตราการไหลคงที่ให้นานที่สุด



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

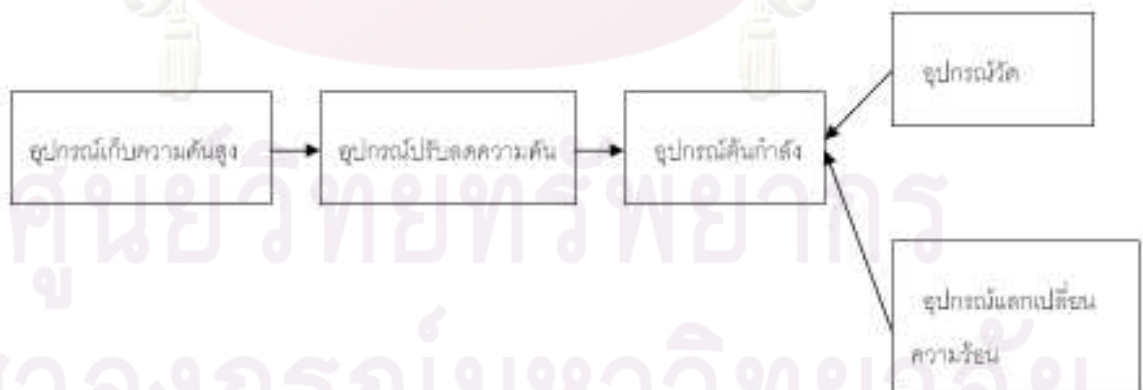
บทที่ 4

การออกแบบเครื่องยนต์ต้นแบบสำหรับการวิจัย

จากการรวบรวมข้อมูลต่างๆที่เกี่ยวข้องกับอุปกรณ์ที่จำเป็นสำหรับการทดลอง เพื่อประเมินความเป็นไปได้ในการออกแบบเครื่องยนต์ให้สอดคล้องและสามารถเก็บผลการทดลองได้จริง จำเป็นจะต้องทำการศึกษาทั้งทฤษฎีและอุปกรณ์ที่มีจำหน่ายในท้องตลาดควบคู่กันไป โดยลองผิดลองถูก ซึ่งเสียเวลาในการทดสอบเป็นอย่างมากจึงจะสรุปว่าอุปกรณ์ใดมีความเหมาะสมกับการทำการทดลองให้สัมฤทธิ์ผลในงบประมาณจำกัด และมีคุณประโยชน์มากเพียงพอแก่การพัฒนาในอนาคต ซึ่งจะลำดับการออกแบบพอสังเขป ได้ดังนี้

4.1 ลำดับแนวคิดและการออกแบบอุปกรณ์ทั้งระบบ

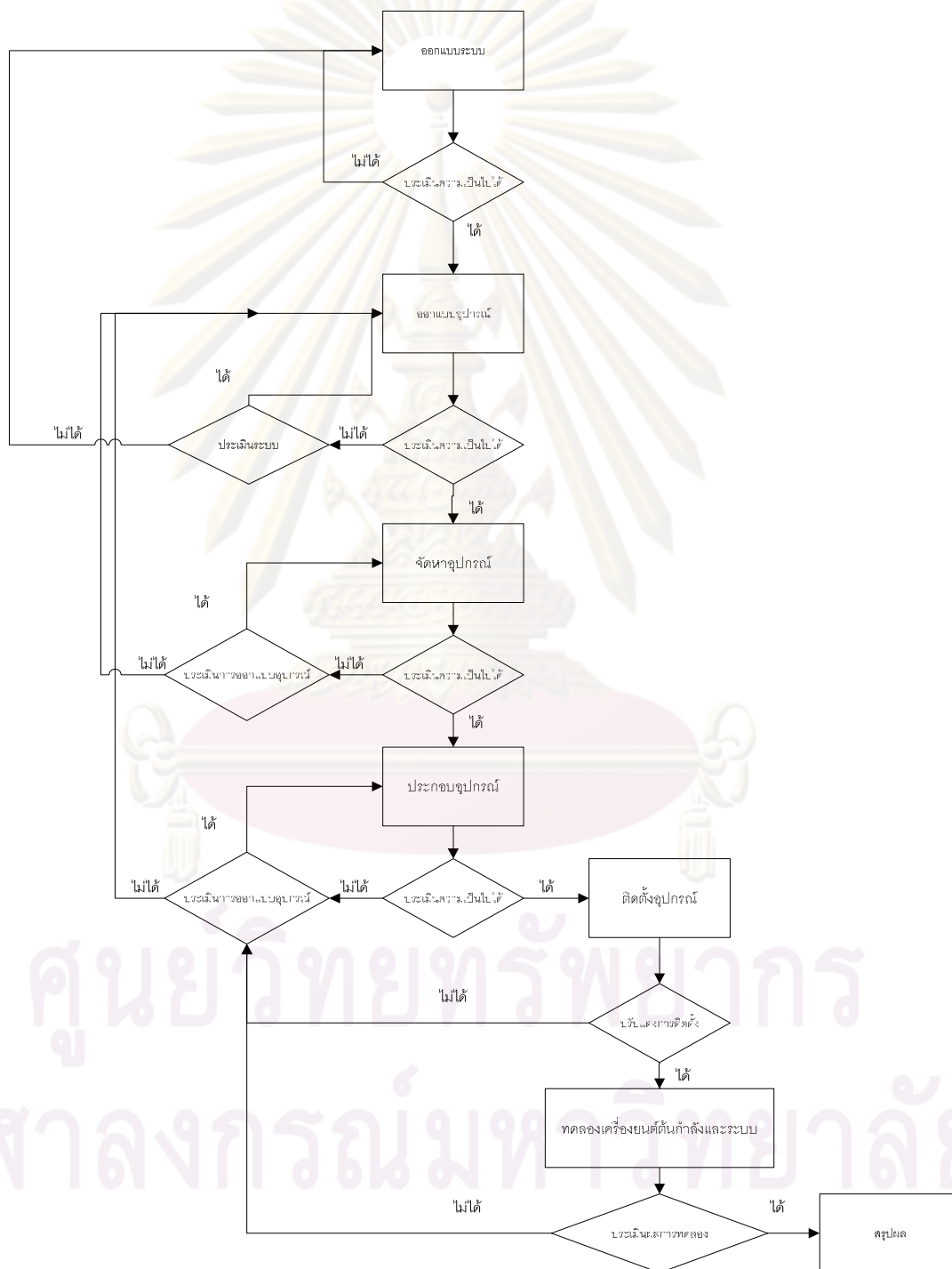
เนื่องจากเครื่องยนต์ที่ใช้อากาศความดันเป็นต้นกำลังไม่เป็นที่แพร่หลายมากนักในประเทศไทย ดังนั้นการหาต้นแบบที่ใช้ประโยชน์จริงจึงเป็นไปได้ยากมาก อย่างไรก็ตามความน่าจะเป็นที่จะสร้างเครื่องโดยชิ้นส่วนที่ออกแบบเองทั้งสิ้นก็มีความเป็นไปได้ไม่น้อยมาก ดังนั้นการพิจารณาชิ้นส่วนที่มีจำหน่ายในท้องตลาดและทำการปรับปรุงให้สอดคล้องจึงเป็นหนทางที่เป็นไปได้มากที่สุด เริ่มจากกำหนดภาพคร่าวๆดังนี้



รูปที่ 4-1 แผนผังการสร้างอุปกรณ์ที่จำเป็นสำหรับระบบต้นกำลังที่วิจัย

พิจารณาอุปกรณ์เก็บความดันสูงที่มีในท้องตลาด ก็จะเป็นถังไร้รอยต่อที่ใช้ทั่วไปในงานอุตสาหกรรมโดยมีความจุภายในถึงประมาณ 48 ลิตรที่ความดัน 140 บรรยากาศ ประกอบด้วย

อุปกรณ์ปรับลดความดันที่ (Pressure regulator) สามารถเลือกค่าได้ระหว่าง 50- 25 บรรยากาศ แสดงว่าสามารถหาแหล่งจ่ายพลังงานให้กับระบบได้ ดังนั้นต่อไปจะเป็นการพิจารณาระบบทั้งหมดที่จะสร้างขึ้น โดยสามารถอธิบายเป็นแผนผังวิธีคิดดังนี้



รูปที่ 4-2แผนผังวิธีคิดในการสร้างอุปกรณ์ทั้งระบบ

1 ออกแบบระบบ

เมื่อสามารถกำหนดระบบอย่างคร่าวๆแล้ว ระบบจะประกอบไปด้วยส่วนหลัก 3 ส่วนคือ 1) ส่วนที่เกี่ยวข้องกับการเก็บกักก๊าซและการไหลของก๊าซ 2) ส่วนที่เกี่ยวข้องกับการขยายตัวของก๊าซเพื่อแปรเปลี่ยนพลังงานของไหลเป็นพลังงานทางกล 3) ส่วนที่เกี่ยวข้องกับการวัดกำลังงานทางกลและสถานะภาพของของไหล

2 ออกแบบอุปกรณ์

อุปกรณ์ที่เกี่ยวข้องกับการขยายตัวของก๊าซที่ใช้ในการแปรเปลี่ยนพลังงานในของไหลเป็นกำลังงานทางกลที่มีช่วงการทำงานที่ความดันสูง 50 – 25 บรรยากาศไม่สามารถค้นหาได้ในท้องตลาดทั่วไป ดังนั้นการออกแบบจึงได้นำเป็นลมที่ช่างซ่อมรถใช้ในการขันน็อตล้อมาดัดแปลง โดยพิจารณาจากความเป็นไปได้ที่จะประกอบอุปกรณ์บางส่วนเพื่อให้สามารถทนความดันที่ระดับสูงขึ้นได้ อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนในระบบที่สามารถทนความดันสูงได้โดยใช้ท่อทองแดงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง $\frac{1}{4}$ นิ้วหนา 1.1 มิลลิเมตร ยาวประมาณ 1 เมตรคดในถึงน้ำที่มีการควบคุมอุณหภูมิ อุปกรณ์ที่ใช้วัดกำลังงานทางกลได้ใช้ไดนาโมแบบใช้แรงเสียดทาน ที่รัฐศมีของถูกรอกและเพิ่มแรงเสียดทานที่ผิวรอกโดยการถ่วงน้ำหนักในทิศทางเดียวกับที่หมุน โดยสามารถอ่านแรงดึงเชือกได้ทำให้สามารถคำนวณหาแรงบิดที่เกิดขึ้นได้ พร้อมกับวัดความเร็วรอบของเพลาด้วย Tachometer

3 จัดหาอุปกรณ์

เมื่อสามารถสรุปรูปแบบระบบที่ต้องการเบื้องต้นจำเป็นต้องออกสู่ตลาดขายอุปกรณ์ลมทั้งของเก่าและของใหม่ และอุปกรณ์เชื่อมต่อระบบท่อ รวมถึง โครงสร้างที่ใช้ติดตั้งอุปกรณ์ต่างๆ โดยในขั้นนี้เมื่อไม่สามารถหาอุปกรณ์ที่ต้องการได้จริงๆ หรือเกินงบประมาณมาก ก็จำเป็นต้องหาอุปกรณ์ประเภทอื่นแทน

4 ประกอบอุปกรณ์

อุปกรณ์ที่สามารถจัดหาได้ตามแผนการ แล้วจะนำมาประกอบตามแบบที่กำหนดไว้เบื้องต้น โดยส่วนมากการประกอบอุปกรณ์ครั้งแรกจะไม่สามารถทำงานได้เป็นปกติ จำเป็นต้องแก้ไขขนาดของชิ้นส่วนบางชิ้น หรือเปลี่ยนอุปกรณ์เป็นชนิดอื่นตามความเหมาะสม ซึ่งต้องประเมินความเป็นไปได้ยู่ตลอดการประกอบอุปกรณ์ทุกชิ้น

5 ติดตั้งอุปกรณ์

เมื่อประกอบอุปกรณ์ได้ตามแผนการ โดยสามารถทำงานได้เป็นปกติอุปกรณ์ทั้งหมดจะต้องมาติดตั้งรวมกันให้เป็นระบบตามแบบ เนื่องจากการติดตั้งจะมีข้อผิดพลาดบ้างซึ่งจะส่งผลกระทบต่อการทำงานของระบบโดยรวม เช่น การติดตั้งเพลาของอุปกรณ์ไม่ตรงศูนย์กลางจะทำให้การหมุนมีปัญหา

ซึ่งส่งผลต่อกำลังทางกลที่วัดได้และการไหลของของไหลจะไม่คงตัว เป็นต้น ก็จำเป็นจะต้องทดสอบระบบและติดตั้งใหม่

6 ทดสอบระบบและปรับแต่งเพื่อการวัดค่า

เมื่อติดตั้งอุปกรณ์ทั้งหมดได้ตามแบบก็จะทำการทดลองเพื่อหาลำดับกำลังทางกลของระบบและวัดค่าสถานะของของไหลอื่นๆ ในขณะเดียวกันจำเป็นต้องสังเกตอาการของระบบเพื่อปรับแต่งให้ระบบทำงานได้ดีขึ้นและได้ค่าการวัดที่มีความน่าเชื่อถือ

4.2 ลักษณะของอุปกรณ์ขยายตัวชนิดต่างๆ

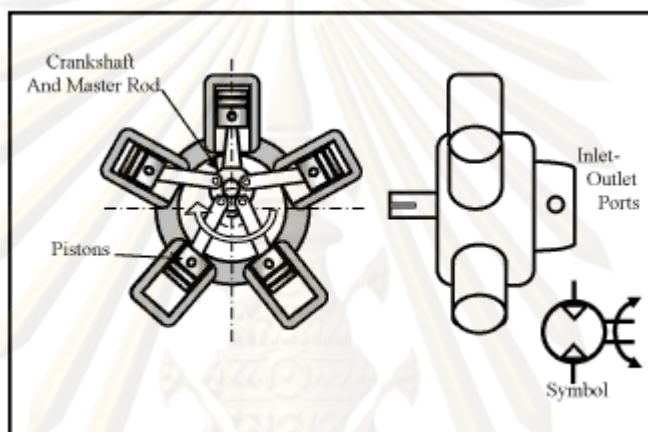
อุปกรณ์ขยายตัวของก๊าซที่เปลี่ยนพลังงานศักย์ของอากาศอัดเป็นกำลังงานทางกลมีหลายประเภทซึ่งอุปกรณ์เหล่านี้ถูกเรียกว่า มอเตอร์ลม โดยทั่วไปที่นิยมใช้กันในวงกว้างมีอยู่ 4 ประเภทคือ

4.2.1 แบบใช้ลูกสูบ (Piston air motor)

มอเตอร์ลมแบบลูกสูบถูกนำไปใช้ในอุปกรณ์ที่ต้องการกำลังงานทางกลสูง แรงบิดออกตัวสูง และสามารถควบคุมความเร็วรอบที่ความเร็วรอบต่ำได้ดี โดยทั่วไปจะมีจำนวนกระบอกสูบตั้งแต่ 2 สูบจนกระทั่ง 6 สูบ โดยเรียงตัวแบบแถวเรียงตัวตามแนวเพลลา และเรียงตัวรอบตามแนวรัศมี แรงบิดที่ได้จะมีค่าแปรตามความดันที่กระทำที่หน้าผิวลูกสูบภายในกระบอกสูบ มอเตอร์ลมที่มีจำนวนกระบอกสูบมากกว่าสี่สูบขึ้นไปจะทำให้ความคงตัวของแรงบิดดีกว่าที่ความเร็วรอบเดียวกัน เพราะว่าจำนวนการให้กำลังงานของไหลจะเหลื่อมกัน ในแต่ละรอบการหมุนและสามารถทดแทนการสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นได้ดีกว่าในทุกช่วงความเร็ว กำลังงานที่ได้จากมอเตอร์ลมแบบลูกสูบจะขึ้นกับความดันที่จ่าย, จำนวนกระบอกสูบ และพื้นที่ผิวหน้าลูกสูบ, ความยาวช่วงชักลูกสูบ และความเร็วรอบ เมื่อจ่ายอากาศความดันเข้าสู่มอเตอร์จะได้กำลังงานกลที่มากขึ้นเมื่อความเร็วรอบสูงขึ้น, พื้นที่ผิวหน้าลูกสูบมากขึ้น, จำนวนกระบอกสูบมากขึ้น หรือ ช่วงชักที่ยาวขึ้น โดยข้อจำกัดของความเร็วรอบจะเกิดจากความเฉื่อยของชิ้นส่วนที่เคลื่อนที่ และการออกแบบวาล์วที่ใช้ในการควบคุมทางเข้าออกของอากาศ ไม่ว่าจะการเรียงตัวของกระบอกสูบจะเป็นแบบแถวเรียงหรือเรียงตัวรอบตามแนวรัศมี ข้อจำกัดที่สำคัญคือจำเป็นต้องหล่อลื่นผิวกระบอกสูบด้วยน้ำมันเครื่องหรือจาระบีซึ่งทำให้แนวของแกนเพลลาข้อเหวี่ยงจะต้องอยู่ในแนวราบ อย่างไรก็ตามได้มีการคิดวิธีการหล่อลื่นแบบพิเศษ ซึ่งทำให้แกนเพลลาของมอเตอร์สามารถวางตัวในแนวตั้งได้แต่ก็ไม่เป็นแบบที่ใช้กันอย่างกว้างขวางมากนัก

4.2.1.1 มอเตอร์ลมแบบกระบอกสูบเรียงตัวรอบตามแนวรัศมี (Radial-piston air motor)

จุดเด่นของมอเตอร์ลมแบบกระบอกสูบเรียงตัวรอบตามแนวรัศมีคือมีความทนทาน สามารถหล่อลื่นได้ด้วยน้ำมันเครื่องและเหมาะสมในการเดินเครื่องแบบต่อเนื่อง โดยมีแรงบิดออกตัวสูงที่สุดเมื่อเทียบกับมอเตอร์ลมแบบอื่นซึ่งสามารถรับภาระมากได้ตั้งแต่เริ่มออกตัว การหล่อลื่นของจังหวะการให้กำลังจะทำให้แรงบิดมีความคงตัวสูงทั้งทิศทางการหมุนตามเข็มนาฬิกาและทวนเข็มนาฬิกา โดยปกติขนาดที่ผลิตจากโรงงานจะมีตั้งแต่ขนาดเล็กจนกระทั่งกำลัง 35 แรงม้าที่ความเร็วรอบ 4500 รอบต่อนาที

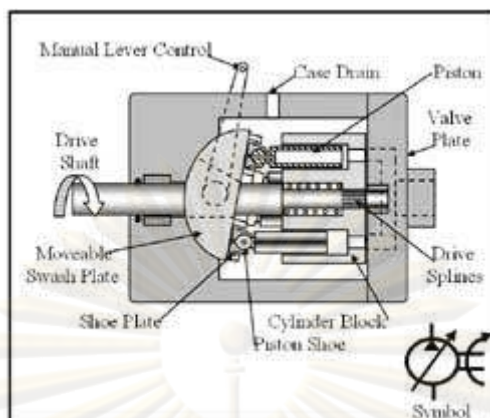


รูปที่ 4-3 ลักษณะของมอเตอร์ลมแบบกระบอกสูบเรียงตัวรอบตามแนวรัศมี[17]

4.2.1.2 มอเตอร์ลมแบบกระบอกเรียงตัวตามแนวเฟลา (Axial-piston motor)

มอเตอร์ลมแบบกระบอกเรียงตัวตามแนวเฟลามีขนาดเล็กกว่าแบบกระบอกสูบเรียงตัวรอบตามแนวรัศมีมาก ซึ่งทำให้มอเตอร์ลมประเภทนี้สามารถติดตั้งได้ในที่อับ อย่างไรก็ตาม ความซับซ้อนของชิ้นส่วนและราคาที่สูงกว่ามอเตอร์ลมแบบใบพัดเลื่อน รวมถึงการหล่อลื่นผิวกระบอกสูบ ทำให้ไม่เป็นที่นิยมใช้กันนัก นอกเสียจากว่าจำเป็นต้องการแรงบิดคงตัวและกำลังงานสูงสุดที่ความเร็วรอบต่ำ ซึ่งมอเตอร์ลมแบบใบพัดเลื่อนไม่สามารถตอบสนองได้ เมื่อเทียบกับน้ำหนักและขนาดเดียวกันกับมอเตอร์ไฟฟ้าจะได้กำลังงานที่สูงกว่าโดยเฉพาะการติดตั้งในที่อุณหภูมิภายนอกสูงก็ไม่เป็นปัญหาสำหรับมอเตอร์ลมประเภทนี้ โดยปกติขนาดที่ผลิตจากโรงงานจะมีตั้งแต่ $\frac{1}{2}$ - 3 แรงม้า

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4-4 ลักษณะของมอเตอร์ลมแบบกระบอกเรียงตัวตามแนวเพลลา [17]

4.2.2 แบบใบพัดเลื่อน (Sliding vane air motor)

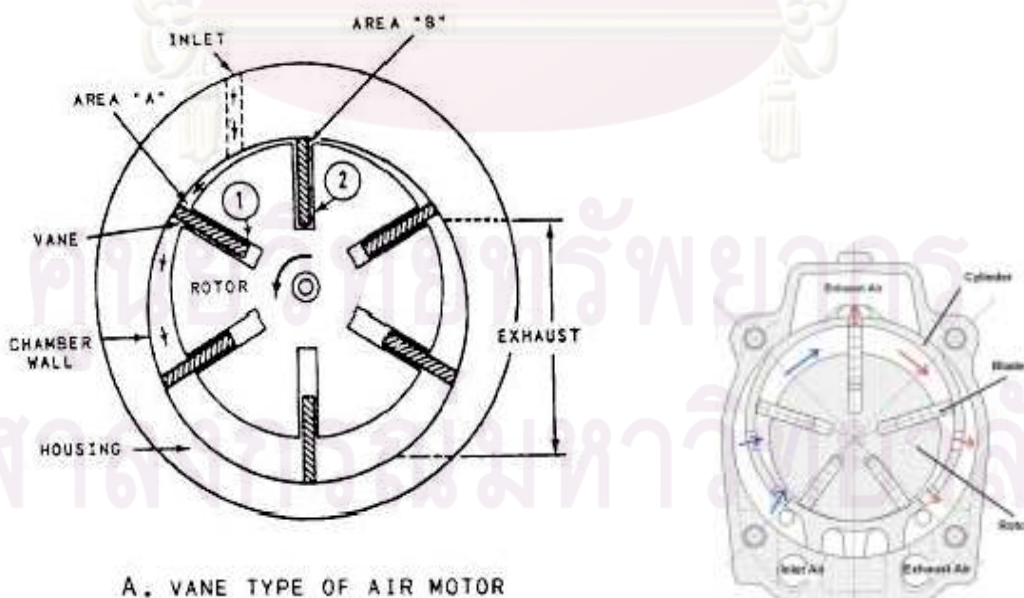
โดยปกติมอเตอร์ลมแบบใบพัดเลื่อนจะถูกใช้สำหรับระบบที่ต้องการกำลังงานต่ำถึงระดับกลาง เพราะมีรูปแบบที่ง่ายและขนาดกระทัดรัด โดยอุปกรณ์ขยายตัวประเภทนี้จะนำไปใช้ในเครื่องมือช่างที่ทำงานด้วยลมเกือบทุกชนิด

มอเตอร์ลมแบบใบพัดเลื่อนจะประกอบไปด้วยใบพัดวางตัวตามแนวแกนเพลลาหมุน วางตัวตามความยาวของแกนหมุน โดยเพลลาหมุนนี้จะติดตั้งแบบเอียงศูนย์กลางภายในห้องหมุน ตามรูปที่ 4-5 โดยผิวใบพัดจะสัมผัสกับผิวห้องหมุนอยู่ตลอดการหมุนแบบคงตัว ด้วยแรงกดจากสปริงค์, เพลาลูกเบี้ยว หรือแรงที่ได้จากความดันอากาศ แล้วแต่การออกแบบ และแรงหนีศูนย์กลางจะทำให้ใบพัดกั้นลมภายในระหว่างใบพัดกับผิวห้องหมุนอีกด้วย แรงบิดที่ได้จากเพลลาหมุนจะเกิดจากแรงที่ความดันกระทำกับพื้นผิวใบพัดส่วนที่เลื่อนออกมาซึ่งเป็นสัดส่วนโดยตรงแก่กัน โดยแรงบิดนี้จะแปรผันตามพื้นที่ส่วนเลื่อนของใบพัดที่ความดันของไหลกระทำ, ความดัน และรัศมีมีความยาวของแขนโมเมนต์ (ความยาวจากจุดศูนย์กลางแกนหมุนถึงกึ่งกลางเฉลี่ยของส่วนที่ใบพัดเลื่อนออกมา) ในมอเตอร์ลมแบบใบพัดเลื่อน แรงบิดสามารถเพิ่มขึ้นในความเร็วรอบการหมุนเดียวกันด้วยการเพิ่มความดันที่เข้าสู่มอเตอร์เพื่อทำให้ความไม่สมดุลของความดันแต่ละห้องใบพัดสูงขึ้น อย่างไรก็ตามด้วยวิธีการนี้จะทำให้ค่าใช้จ่ายเพื่อสร้างลมอัดความดันมีค่าสูงขึ้นและเกิดการสึกหรอของใบพัดเร็วขึ้น

กำลังงานทางกลที่ได้จากการใช้ลมอัดความดันที่ความดันเดียวกันในมอเตอร์ลมขนาดเล็กกว่าจำเป็นต้องใช้อัตราการไหลของของไหลทำงานมากกว่ามอเตอร์ลมขนาดใหญ่ที่ความเร็วรอบการหมุนเดียวกัน เช่น จำอากาศความดัน 80 ปอนด์ต่อตารางนิ้วในมอเตอร์ลมขนาดเล็กได้กำลังงาน 1 แรงม้าที่ความเร็วรอบ 2,000 รอบต่อนาที จะต้องใช้อัตราการไหลที่มากกว่าในกรณีที่ใช้มอเตอร์ลมขนาดใหญ่กว่า

มอเตอร์ลมแบบใบพัดเลื่อนโดยทั่วไปจะมีจำนวนใบพัดตั้งแต่ 3 ใบถึง 10 ใบ โดยจำนวนใบที่มากขึ้นจะส่งผลให้การรั่วภายในของอากาศเกิดน้อยลง ,ทำให้แรงบิดที่ได้มีความต่อเนื่องคงที่มากขึ้น และเสถียรภาพของกำลังงานที่ได้ที่ความเร็วรอบต่ำสูงขึ้น อย่างไรก็ตามจำนวนใบพัดที่มากขึ้นจะส่งผลให้แรงเสียดทานที่เกิดระหว่างผิวใบพัดกับผิวห้องหมุนมีมากขึ้น ,ราคาของมอเตอร์ลมก็จะสูงขึ้น และประสิทธิภาพทางกลจะต่ำลง ในกรณีที่แกนหมุนมีใบพัดเลื่อน 3 ใบจำเป็นจะต้องมีการออกแบบให้ใบพัดหยุดที่ตำแหน่งเริ่มหมุนทุกครั้งเพื่อทำให้แกนหมุนสามารถหมุนได้ในกรณีที่มีการเริ่มต้น ปัญหานี้สามารถแก้ได้โดยการออกแบบให้มีสปริงคั่นใบพัดเลื่อนให้แนบสนิทกับผิวห้องหมุนตลอดเวลา ,ออกแบบช่องลมที่ฐานใบพัดโดยเมื่อจ่ายลมอัดสู่มอเตอร์ใบก็จะเลื่อนแนบสนิทกับผิวห้องหมุน หรือใช้ระบบลูกเบี้ยวคั่นฐานใบพัดให้ใบแนบกับผิวห้องหมุน โดยมีจำนวนใบพัดเลื่อนมากกว่า 4 ใบขึ้นไป

มอเตอร์ลมแบบใบพัดเลื่อนโดยทั่วไปจะมีความเร็วรอบตั้งแต่ 100 ถึง 25,000 รอบต่อนาที ขึ้นกับขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของห้องหมุน และสามารถให้กำลังงานต่อน้ำหนักเครื่องที่มากกว่ามอเตอร์ลมแบบลูกสูบ เนื่องจากใบพัดเลื่อนต้องแนบกับผิวห้องหมุนตลอดการหมุนดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีการหล่อลื่นที่ผิวห้องหมุน อย่างไรก็ตามเนื่องจากเหตุผลในการรักษาสภาพแวดล้อมที่ทำงาน จึงได้มีการออกแบบมอเตอร์แบบใช้การหล่อลื่นน้อยจนถึงไม่ใช้การหล่อลื่นเลย การให้มอเตอร์หมุนตัวเปล่าโดยไม่ได้ให้ภาระเป็นสิ่งที่ไม่ควรกระทำเพราะจะทำให้แกนหมุนหมุนที่ความเร็วรอบสูงซึ่งทำให้เกิดความร้อนและการสึกหรอของผิวใบพัดที่สัมผัสกับผิวห้องหมุน ซึ่งจะทำให้เศษชิ้นส่วนที่เกิดจากการเสียดสีไปทำลายชิ้นส่วนอื่นของระบบของไหลได้

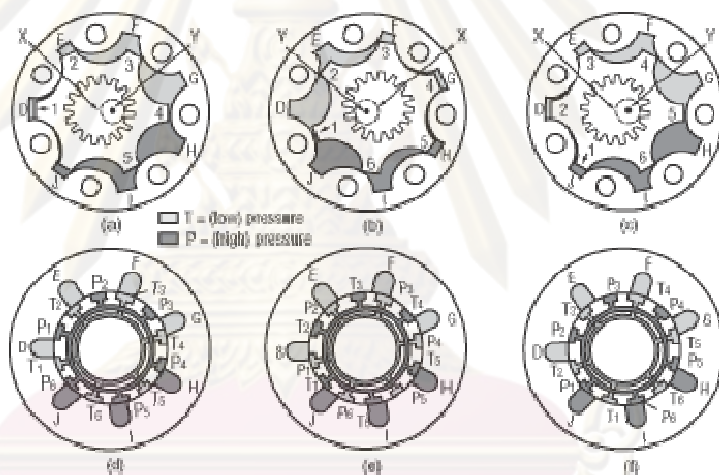


A. VANE TYPE OF AIR MOTOR

รูปที่ 4-5 ลักษณะของมอเตอร์ลมแบบใบพัดเลื่อน [17]

4.2.3 แบบช่องเฟือง (Gerotor air motor)

มอเตอร์ลมแบบช่องเฟืองจะให้แรงบิดสูงมากที่ความเร็วรอบต่ำโดยไม่ต้องผ่านชุดเฟืองทด มอเตอร์ลมประเภทนี้เหมาะสมสำหรับพื้นที่อันตราย โดยจำเป็นต้องการอุปกรณ์แรงบิดสูง ที่ความเร็วรอบต่ำสามารถให้แรงบิดได้ถึง 250 lb-in ที่ความเร็วรอบ 20-100 รอบต่อนาที โดยจ่ายอากาศความดัน 90 ปอนด์ต่อตารางนิ้วถึง 150 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว เนื่องจากการหมุนซ้ำมากของ แกนหมุนดังนั้นการเริ่มหมุนการหยุดหมุน และการเปลี่ยนทิศทางการหมุนจึงมีเสถียรภาพ การออกแบบมอเตอร์ลมแบบช่องเฟืองจะออกแบบให้สามารถหมุนได้ทางเดียวโดยไม่เกิดการหมุนย้อนกลับเช่นเดียวกับมอเตอร์ลมแบบใบพัดเลื่อนและส่วนประกอบของมอเตอร์ลมยังมีจำนวนน้อย ขึ้นเหมือนกับมอเตอร์ลมแบบใบพัดเลื่อน โครงสร้างของแกนหมุนจะมีจำนวนฟันน้อยกว่าช่องเฟืองของส่วนที่อยู่กับที่หนึ่งฟันและจุดศูนย์กลางของแกนหมุนจะอยู่ในตำแหน่งเยื้องศูนย์กลางกับห้องหมุน



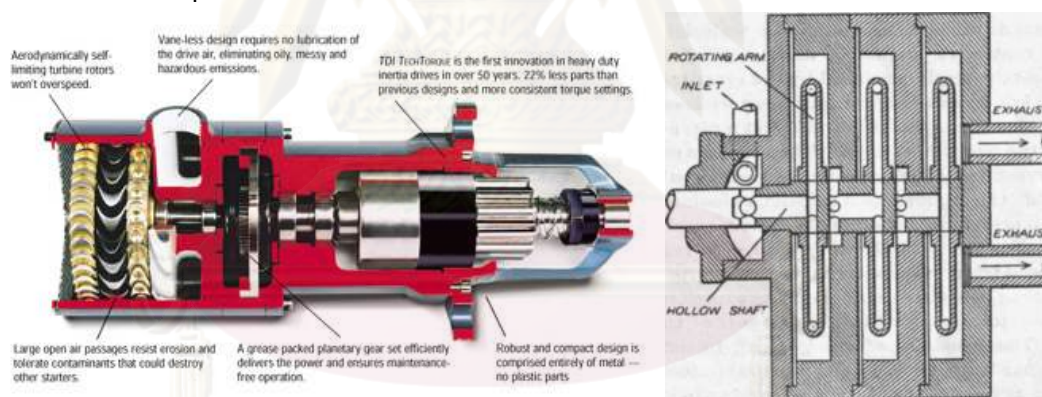
รูปที่ 4-6 ลักษณะของมอเตอร์ลมแบบช่องเฟือง [17]

4.2.4 แบบใบพัด (Turbine air motor)

มอเตอร์ลมแบบใบพัดเป็นอุปกรณ์ลมที่มีประสิทธิภาพในการเปลี่ยนพลังงานศักย์ของอากาศอัดเป็นกำลังงานทางกลที่มีประสิทธิภาพสูงที่สุดถึง 65-75 % เนื่องจากมอเตอร์ลมแบบใบพัดจะไม่เกิดการเสียดสีของส่วนหมุนกับส่วนไม่หมุนเลยยกเว้นเฉพาะตรงตำแหน่งเพลลาหมุน ซึ่งทำให้ไม่จำเป็นต้องการสารหล่อลื่นพิเศษเพิ่มเติมภายในห้องหมุน โดยทั่วไปลักษณะสำคัญของมอเตอร์ลมแบบใบพัดจะทำงานที่ความเร็วรอบสูงมากประมาณ 30,000 รอบต่อนาทีขึ้นไป และแรงบิดต่ำมาก ซึ่งอุปกรณ์ที่ประยุกต์ใช้งานส่วนมากจะเป็นอุปกรณ์ทันตกรรม และอุปกรณ์ภายในเครื่องยนต์ไอพ่นของอากาศยาน อย่างไรก็ตามในปัจจุบันได้มีการพัฒนาให้สามารถเป็นระบบช่วยคิดเครื่องยนต์ลูกสูบในหลายขนาดตั้งแต่เล็กจนกระทั่งขนาดใหญ่ มอเตอร์ลมแบบใบพัดมีส่วนประกอบที่

พื้นฐานมาก ,ประสิทธิภาพทางกลสูง, ไม่ต้องการสารหล่อลื่นในอากาศที่จ่ายเข้าระบบ และทนต่อสารปนเปื้อนในของไหลได้ดี ดังนั้นจึงง่ายต่อการบำรุงรักษา มอเตอร์ลมแบบใบพัดที่ประกอบด้วยชุดเฟืองทดแบบเพนนิทารี (Planetary gear) เพื่อลดความเร็วรอบให้อยู่ในระดับมอเตอร์ลมทั่วไป มอเตอร์ลมแบบใบพัดมีขนาดกระทัดรัดและน้ำหนักเบาเมื่อเทียบกับกำลังงานทางกลที่ได้ โดยเมื่อมีการทดความเร็วรอบระหว่าง 9:1 ถึง 20:1 ซึ่งทำให้แรงบิดเริ่มต้นสูงขึ้นและสามารถเทียบกับมอเตอร์ลมประเภทอื่น ได้ กำลังงานทางกลที่ได้สามารถเปลี่ยนได้โดยง่ายแค่เปลี่ยนอัตราการไหลของมวลอากาศ

การทำงานของมอเตอร์ลมแบบใบพัดจะขึ้นอยู่กับขนาดนอสเซลล์และทิศทางการติดตั้ง ซึ่งทำหน้าที่เปลี่ยนของไหลที่ความดันสูงความเร็วต่ำเป็นสถานะที่ความดันต่ำและความเร็วสูง อัตราการไหลของมวลที่ไหลผ่านใบพัดและจำนวนนอสเซลล์เป็นปริมาณที่บ่งบอกถึงกำลังงานทางกลที่ได้ ซึ่งเป็นสัดส่วนกันโดยตรงเช่น ในกรณีที่ลดจำนวนนอสเซลล์จาก 16 ตัวเป็น 8 ตัวกำลังงานทางกลที่ได้ก็จะลดไปครึ่งหนึ่งด้วย เป็นต้น ด้วยคุณสมบัตินี้ทำให้มีมอเตอร์ลมแบบใบพัดหลายรูปแบบที่ออกแบบให้ สามารถใช้งานได้ในช่วงความดันของของไหลที่กว้าง ,ความเร็วรอบและแรงบิดที่กว้างขึ้นโดยอาศัยชุดเฟืองทด ซึ่งทำให้ได้ระบบช่วยติดเครื่องยนต์หลายประเภทที่มีราคาต่ำ

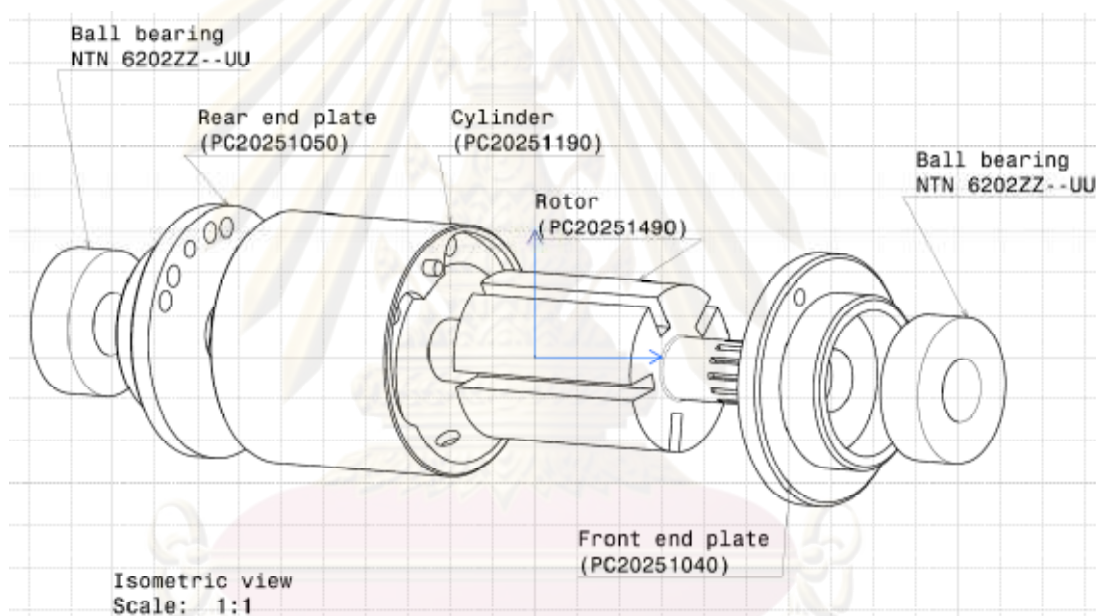


รูปที่ 4-7 ลักษณะของมอเตอร์ลมแบบใบพัด [17]

4.3 การออกแบบอุปกรณ์ขยายตัวของก๊าซ

เนื่องจากอุปกรณ์ที่ใช้ในการขยายตัวมีหลายประเภทดังนั้นการเลือกอุปกรณ์เพื่อการออกแบบต่อจึงมีส่วนสำคัญที่จะทำให้อุปกรณ์ทั้งระบบทำงานได้ภายใต้งบประมาณที่จำกัด ซึ่งชิ้นส่วนที่จะนำมาออกแบบอุปกรณ์เพิ่มเติมควรจะมีรูปแบบที่ง่าย สามารถหาซื้อได้ทั่วไปในราคาไม่แพง โดยเฉพาะอย่างยิ่งคุณลักษณะของกำลังงานกลที่ได้ โดยสรุปเลือกใช้มอเตอร์ลมแบบใบพัดเลื่อนมาดัดแปลงเป็นอุปกรณ์ขยายตัวสองชั้น เพราะประกอบไปด้วยชิ้นส่วนน้อยมีความซับซ้อนน้อย ,

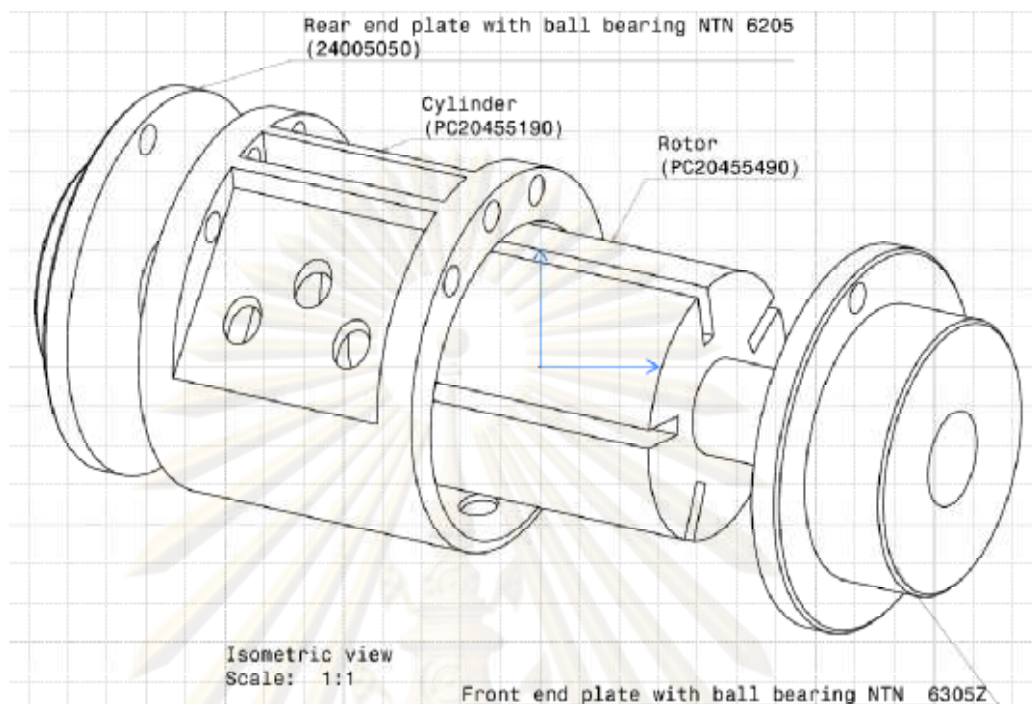
ทำงานที่ความเร็วรอบ 1,000 รอบต่อนาทีขึ้นไป,สามารถทนต่อค่าความผิดพลาดจากการขึ้นรูป ชิ้นส่วนเพิ่มเติมได้ดีกว่าแบบอื่นและราคาไม่แพงเมื่อเทียบกับอุปกรณ์ประเภทอื่น โดยอุปกรณ์ที่ใช้ในการขยายตัวของก๊าซที่ความดันสูงเลือกใช้ห้องใบพัดเลื่อนของ Air Impact wrench ยี่ห้อ A.C.E.-200 N ที่มีชิ้นส่วน 6 ชิ้นและใบพัดเลื่อนที่ทำมาจากวัสดุสังเคราะห์ผสมเส้นใยนำมาวัดขนาดอย่างละเอียดทุกชิ้น และอุปกรณ์ที่ใช้ในการขยายตัวความดันต่ำเลือกใช้ห้องใบพัดเลื่อนของ Air Impact wrench ยี่ห้อ A.C.E.-4500 S-W ที่ประกอบไปด้วยชิ้นส่วน 6 ชิ้นและใบพัดเลื่อนที่ใช้วัสดุเดียวกัน จำนวน 5 ใบดังรูป



รูปที่ 4-8 ลักษณะทางกายภาพและการประกอบห้องใบพัดเลื่อนของ Air Impact wrench ยี่ห้อ

A.C.E.-200 N

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



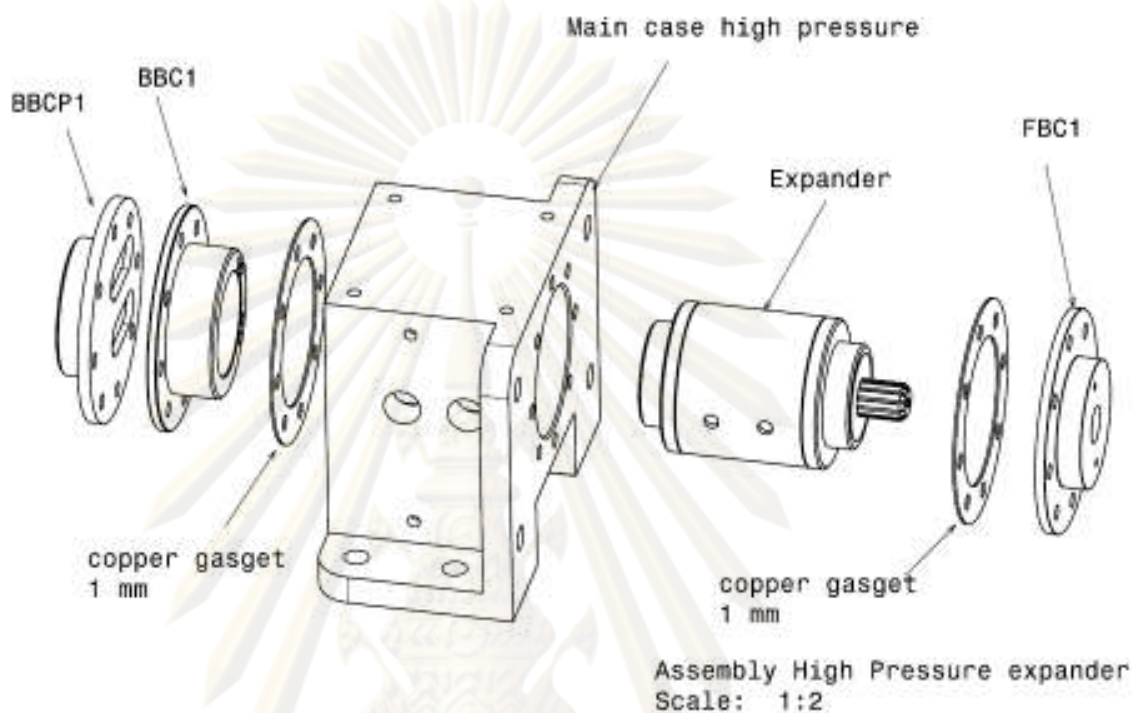
รูปที่ 4-9 ลักษณะทางกายภาพและการประกอบห้องใบพัดเลื่อนของ Air Impact wrench ยี่ห้อ A.C.E.-4500 S-W

เมื่อทำการวัดขนาดและพิจารณา clearance ต่างๆของอุปกรณ์มาตรฐานแล้วจึงเริ่มเขียนแบบของอุปกรณ์มาตรฐานด้วยโปรแกรม CAD โดยเริ่มจากอุปกรณ์ขยายตัวความดันสูงและต่ำก่อน เพื่อความประหยัดงบประมาณและความแข็งแรงของอุปกรณ์รับความดัน จะเลือกวัสดุที่ใช้ในการขึ้นรูปอุปกรณ์ประกอบ คือ เหล็ก Carbon steel class AISI 1045 เป็นหลัก สามารถชุบแข็งได้โดยมีคุณลักษณะทางกลดังนี้ ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส [19]

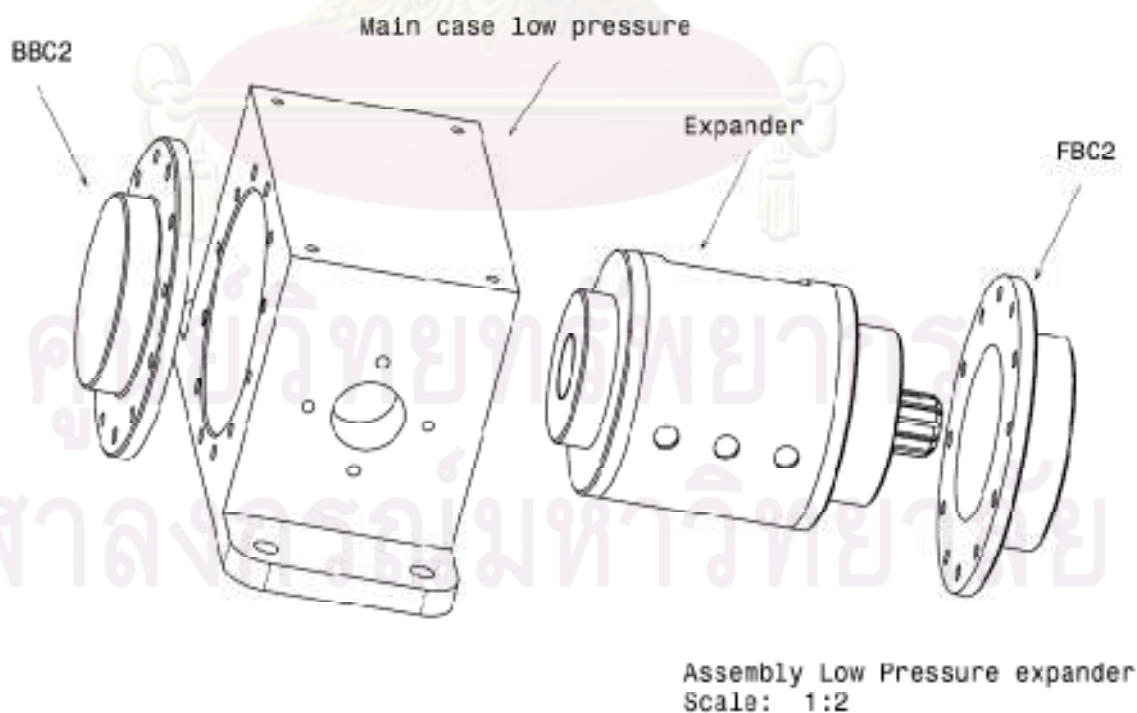
ความหนาแน่น (Density)	7,700 – 8,030 Kg/m ³
สัดส่วนปัวซอง (Poisson 's Ratio)	0.27 – 0.30
โมดูลัสการยืด (Elastic Modulus)	190-210 Gpa
แรงดึงสูงสุด (Tensile Strength)	585 Mpa
แรงดึงถึงจุดคราก (Yield Strength)	505 MPa
การยืดตัวสูงสุด (Elongation)	12 %

การคำนวณขนาดของอุปกรณ์ประกอบต่างๆพิจารณาตามหลักการออกแบบกลศาสตร์วัสดุ สำหรับการแตกหักเนื่องจากความล้าเป็นหลัก (เกณฑ์ของไซเคอร์เบอร์ก)[2] โดยเพิ่มตัวประกอบความปลอดภัยจากปกติอีกประมาณ 2 เท่า โดยความดันใช้งานสูงสุด ออกแบบให้ทนความดันได้ 50 บรรยากาศทั้งชุดอุปกรณ์ขยายตัวความดันสูงและต่ำ การยึดติดอุปกรณ์ประกอบที่ขึ้นรูปส่วน

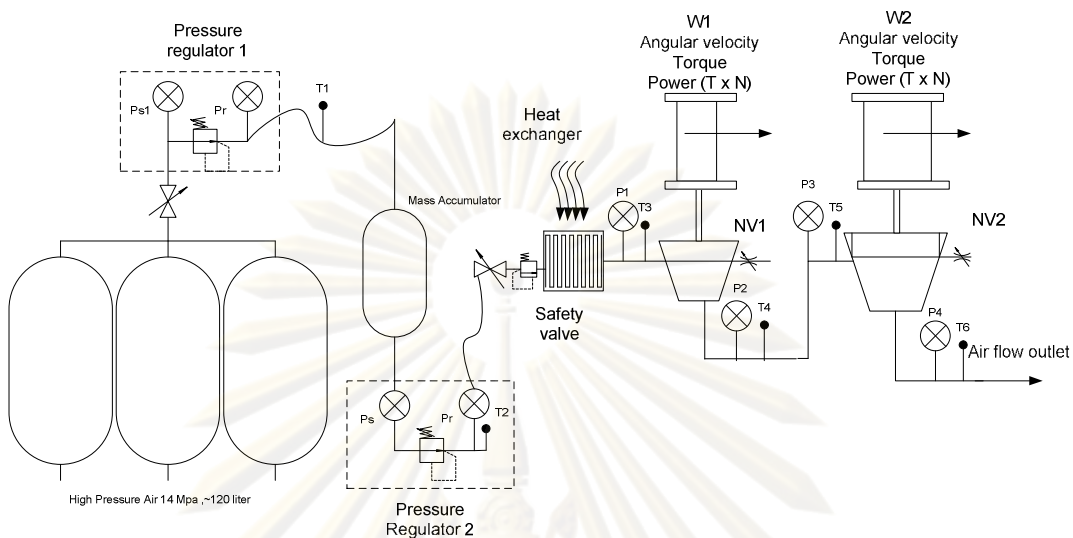
ใหญ่จะใช้หมุดเกลียวเป็นหลัก และข้อต่อก๊าซที่ไหลเข้าและออกจากอุปกรณ์ขยายตัวทั้งระบบจะใช้อุปกรณ์ของไฮดรอลิกอุตสาหกรรมเป็นหลัก



รูปที่ 4-10 ลักษณะทางกายภาพและการประกอบชุดอุปกรณ์ขยายตัวความดันสูง



รูปที่ 4-11 ลักษณะทางกายภาพและการประกอบชุดอุปกรณ์ขยายตัวความดันต่ำ

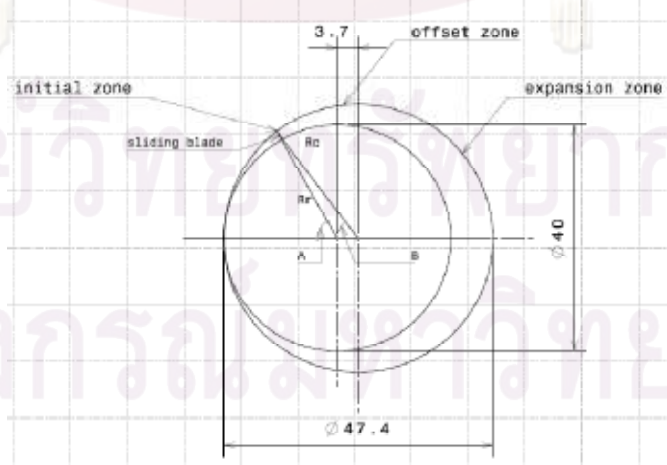


รูปที่ 4-12 ลักษณะการเชื่อมโยงระบบต่างๆของเครื่องยนต์ที่ใช้อากาศอัดความดันเป็นต้นกำลัง

4.3.1 การวิเคราะห์เชิงปริมาตรของอุปกรณ์ขยายตัว

การวิเคราะห์เชิงปริมาตรจะคำนวณ โดยความดันที่เข้าอุปกรณ์เป็นไปตามกฎของก๊าซในอุดมคติและไม่คิดปริมาตรที่เกิดจากความหนาของใบพัดเลื่อนในระหว่างการหมุนของแกนหมุน และละแรงเสียดทานรวมถึงการเปลี่ยนแปลงโมเมนต์ต้นของก๊าซที่อยู่ภายในห้องกันระหว่างใบพัด โดยพิจารณาแรงที่ได้สูงสุดจากความดันสมบูรณ์ (Stagnation Pressure) อย่างเดียว

4.3.1.1 การวิเคราะห์เชิงปริมาตรของอุปกรณ์ขยายตัวความดันสูง (High state Expander)



รูปที่ 4-13 ลักษณะรูปตัดขวางของอุปกรณ์ขยายตัวความดันสูง

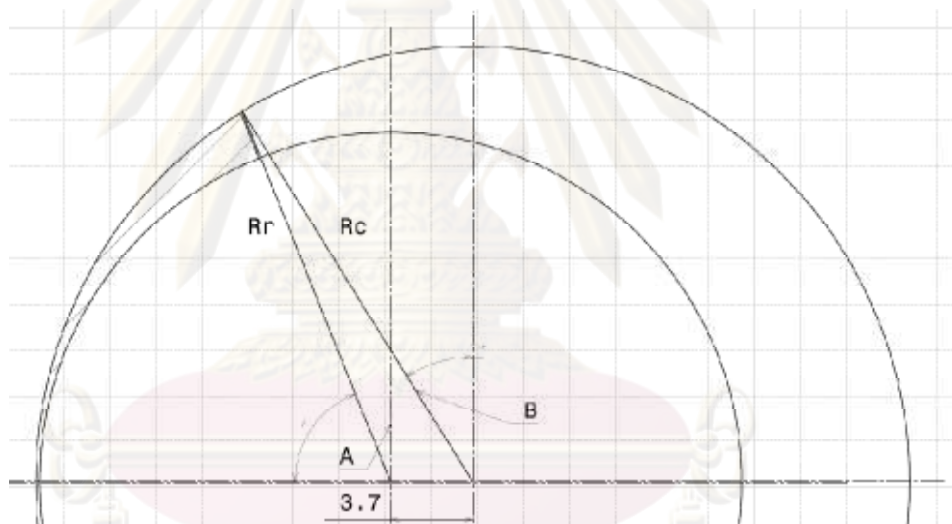
จากรูป สามารถแบ่งช่วงของการหมุนของ Rotor ได้สามช่วง คือ

1 Initial zone คือช่วงที่ใบพัดเคลื่อนที่จากมุม A เท่ากับศูนย์จนกระทั่งมุม A เท่ากับ 90 องศา โดยของไหลทำงาน (ในโตรเจนอัดความดัน) ไหลมารอการขยายตัว

2 Offset zone คือช่วงที่ใบพัดเคลื่อนที่อยู่ระหว่างจุดศูนย์กลางของแกนหมุน (Rotor) และจุดศูนย์กลางของ ห้องหมุน (Stator case) ซึ่งมุม A จะอยู่ระหว่าง 90 องศา จนกระทั่งมุม A เท่ากับ $90 + \frac{180}{\pi} \tan^{-1} \frac{3.7}{R_c}$ องศา โดยของไหลทำงานกำลังจะขยายตัว

3 Expansion zone คือช่วงที่ใบพัดเคลื่อนที่ผ่านจุดศูนย์กลางของ Stator case ซึ่งมุม A จะอยู่ระหว่าง $90 + \frac{180}{\pi} \tan^{-1} \frac{3.7}{R_c}$ องศา จนกระทั่งมุม A เท่ากับ 180 องศา โดยของไหลทำงานจะอยู่ในช่วงกำลังขยายตัวและไหลสู่อุปกรณ์ขยายตัวความดันต่ำในลำดับต่อไป

การคำนวณปริมาตรของของไหลทำงานในช่วง Initial zone



รูปที่ 4-14 รูปตัดขวางในช่วง initial zone ของอุปกรณ์ขยายตัวความดันสูง

ความสัมพันธ์

$$(l + R_r) \sin A = R_c \sin B \dots\dots\dots(1)$$

$$(l + R_r) \cos A + 3.7 = R_c \cos B \dots\dots\dots(2)$$

จาก (1) และ (2)

$$\cos B \tan A - \sin B = \frac{3.7 \tan A}{R_c} \dots\dots\dots(3)$$

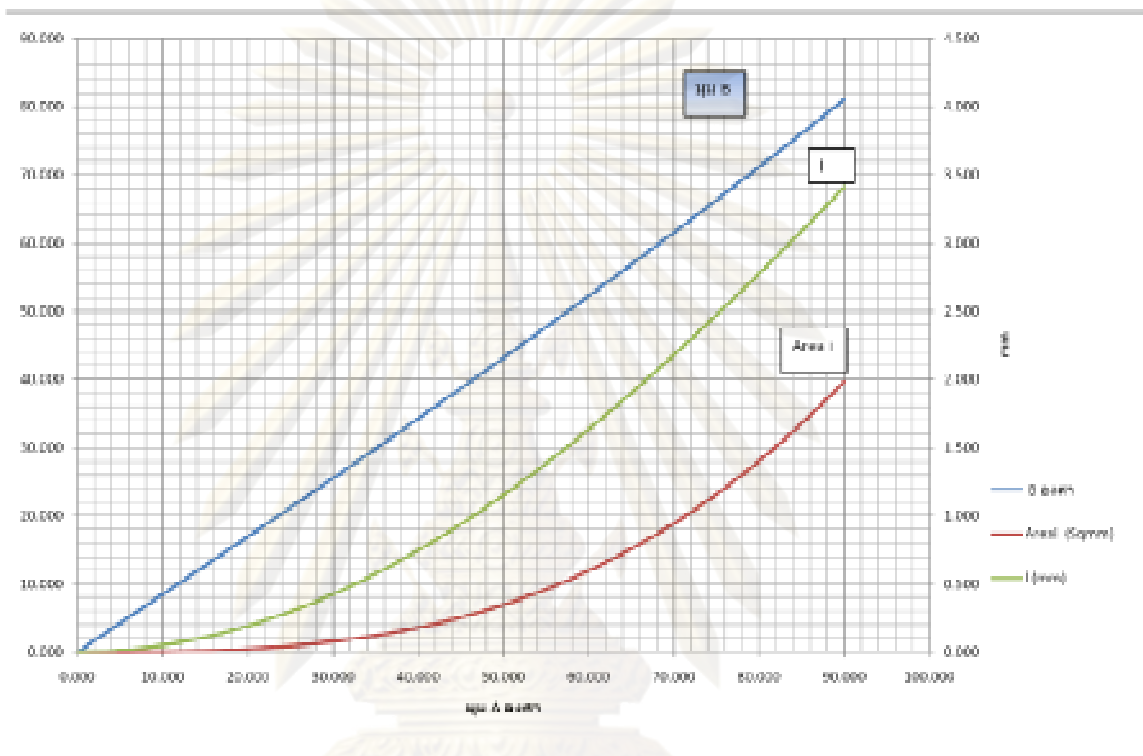
พิจารณาจากรูปภาพเราสามารถคำนวณหาพื้นที่ที่ใบพัดกวาดจากจุดที่มุม A เท่ากับ 0 จนถึงมุม A ได้ดังนี้

$$\text{Area}_1 = \frac{1}{2} [R_c^2 B - R_r^2 A - R_c \cos B \sin B + (R_r + l)^2 \cos A \sin A] \dots\dots\dots(4)$$

$$l = \frac{Rc \cos B - 3.7}{\cos A} - Rr \dots\dots\dots(5)$$

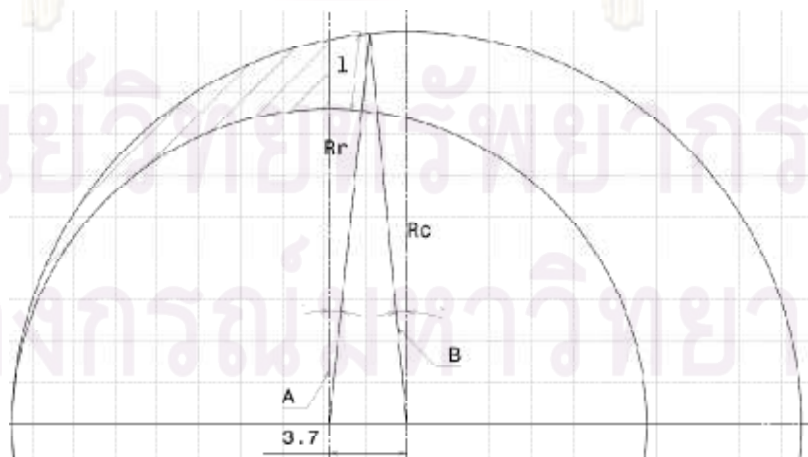
เนื่องจาก สมการ (3) เป็นสมการที่ต้องใช้การ Iteration เพื่อการหาความสัมพันธ์ระหว่างมุม A และ มุม

โดย ความสัมพันธ์ระหว่างมุม A ตั้งแต่ 0 ถึง 90 องศา เป็นดังนี้



รูปที่ 4-15แสดงความสัมพันธ์ระหว่างมุม A มุมB, พื้นที่ที่ไปพักกวาดและความยาวใบพัดที่เลื่อนออกมาภายในช่วง initial zone

การคำนวณปริมาตรของของไหลทำงาน ในช่วง Offset zone



รูปที่ 4-16รูปตัดขวางในช่วง offset zone ของอุปกรณ์ขยายตัวความดันสูง

.ความสัมพันธ์

$$(Rc) \sin B + (Rr + l) \sin A = 3.7 \dots\dots\dots(6)$$

$$(l + Rr) \cos A = Rc \cos B \dots\dots\dots (7)$$

จาก (6) และ (7)

$$\cos B \tan A + \sin B = \frac{3.7}{Rc} \dots\dots\dots(8)$$

พิจารณาจากรูปภาพเราสามารถคำนวณหาพื้นที่ที่ใบพัดกวาดจากจุดที่มุม A เท่ากับ 0 จนถึงมุม A ได้ดังนี้

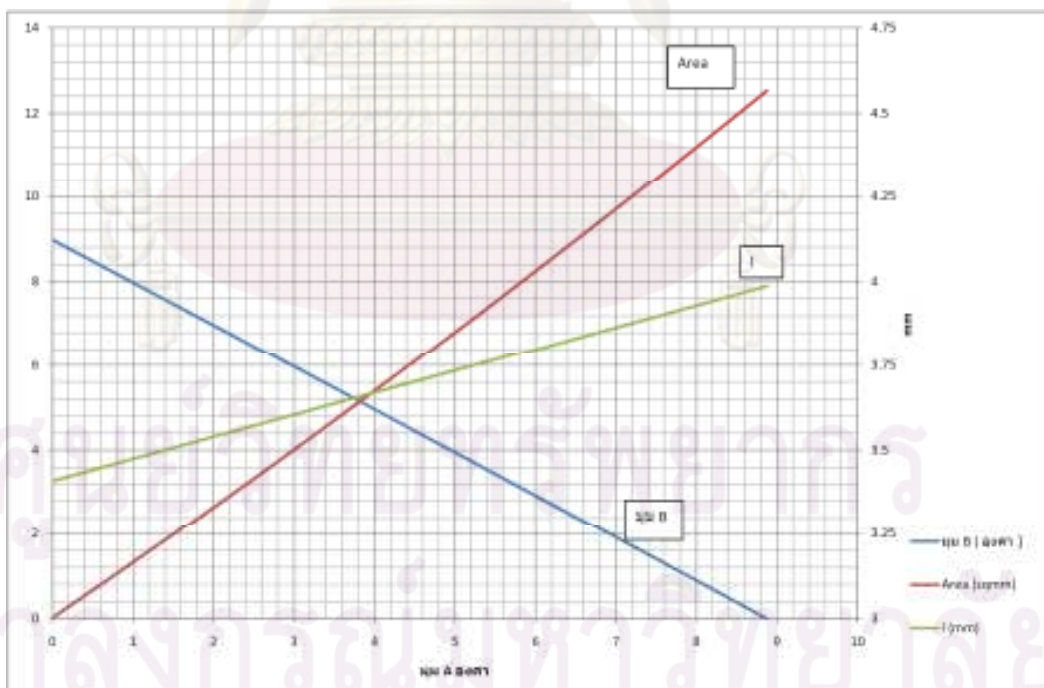
$$\text{Area}_{\text{offset}} = \frac{1}{2} Rc^2 \sin^{-1} \frac{3.7}{Rc} + \frac{1}{2} Rc \cos \left(\tan^{-1} \left(\frac{3.7}{Rc} \right) \right) \cdot (3.7) - \frac{1}{2} Rr^2 \cdot A - \frac{1}{2} (3.7) Rr \cos B - \frac{1}{2} Rc^2 \cdot B \dots\dots\dots(9)$$

$$l = \frac{Rc \cos B}{\cos A} - Rr \dots\dots\dots(10)$$

เนื่องจาก สมการ (8) เป็นสมการที่ต้องใช้การ Iteration เพื่อการหาความสัมพันธ์ระหว่างมุม A และมุม B

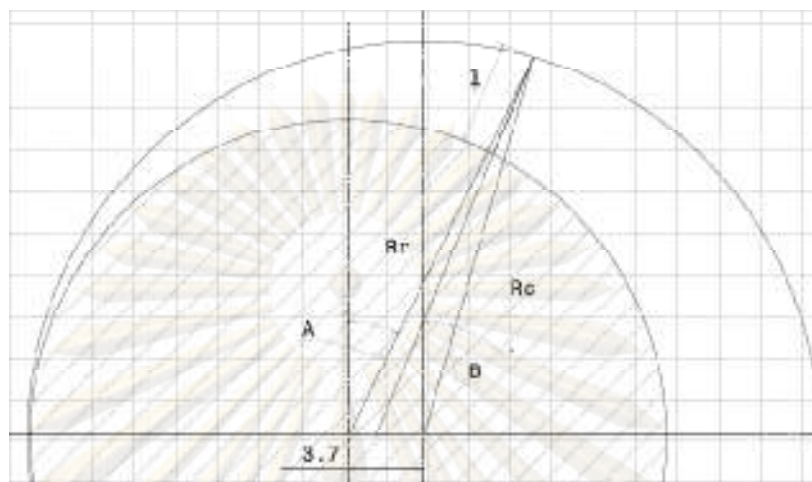
โดย ความสัมพันธ์ระหว่างมุม A ตั้งแต่ 0 ถึง $\frac{180}{\pi} \tan^{-1} \frac{3.7}{Rc}$ องศา (8.873 องศา) เป็นดังนี้

ความสัมพันธ์ระหว่างมุม B ตั้งแต่ $\frac{180}{\pi} \sin^{-1} \frac{3.7}{Rc}$ องศา (8.981 องศา) ถึง 0 องศา ดังนี้



รูปที่ 4-17 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างมุม A มุม B, พื้นที่ที่ใบพัดกวาดและความยาวใบพัดที่เคลื่อนออกมาภายในช่วง offset zone

การคำนวณปริมาตรของของไหลทำงาน ในช่วง expansion zone



รูปที่ 4-18รูปตัดขวางในช่วง expansion zone ของอุปกรณ์ขยายตัวความดันสูง

ความสัมพันธ์

$$(Rc) \sin B + 3.7 = (Rr + l) \sin A \dots\dots\dots(11)$$

$$(l + Rr) \cos A = Rc \cdot \cos B \dots\dots\dots(12)$$

จาก (11) และ (12)

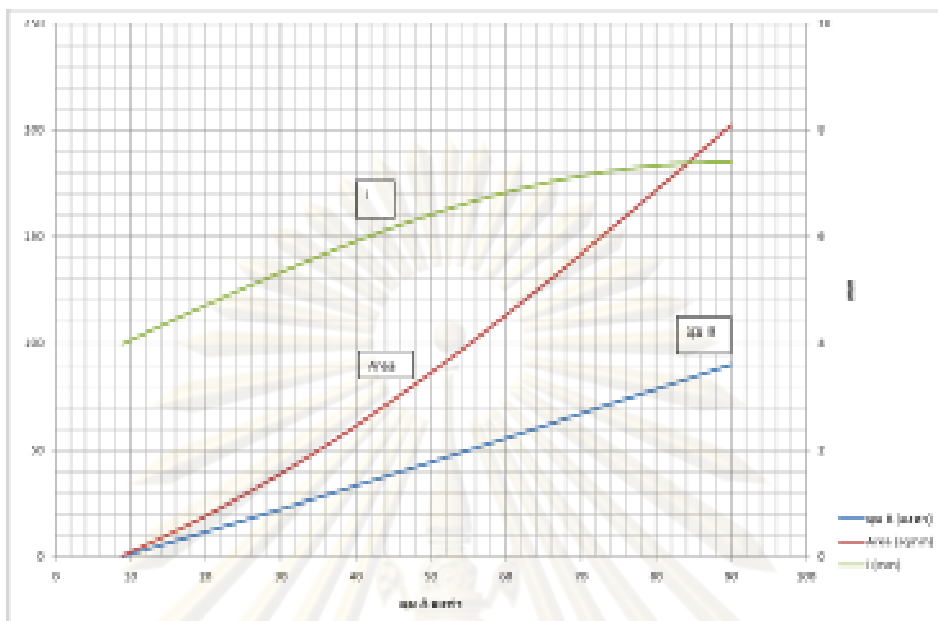
$$\cos B \tan A - \sin B = \frac{3.7}{Rc} \dots\dots\dots(13)$$

พิจารณาจากรูปภาพเราสามารถคำนวณหาพื้นที่ที่ใบพัดกวาดจากจุดที่มุม A เท่ากับ 0 จนถึงมุม A ได้ ดังนี้

$$Area_{exp} = \frac{1}{2} Rc^2 B + \frac{1}{2} Rc(3.7) - \frac{1}{2} Rr^2 (A - A_{lof}) - \left[\frac{1}{2} Rc^2 \sin B \cos B + 3.7 Rc \cos B - 12Rr + l^2 \sin A \cos A \dots\dots\dots(14)$$

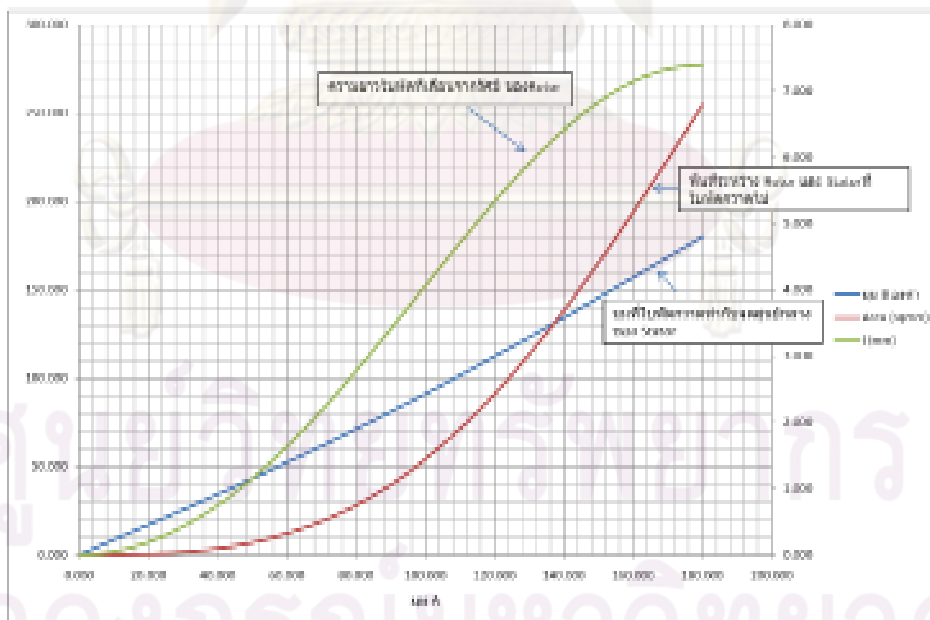
$$l = \frac{Rc \cos B}{\cos A} - Rr \dots\dots\dots (15)$$

เนื่องจาก สมการ (13) เป็นสมการที่ต้องใช้การ Iteration เพื่อการหาความสัมพันธ์ระหว่างมุม A และมุม B โดย ความสัมพันธ์ระหว่างมุม A ตั้งแต่ A_{lof} (8.873 องศา) ถึง 90 องศา เป็นดังนี้ ความสัมพันธ์ระหว่างมุม B ตั้งแต่ 0 องศา ถึง 90 องศา ดังนี้



รูปที่ 4-19 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างมุม A มุม B, พื้นที่ที่ใบพัดกวาดและความยาวใบพัดที่เลื่อนออกมาภายในช่วง expansion zone

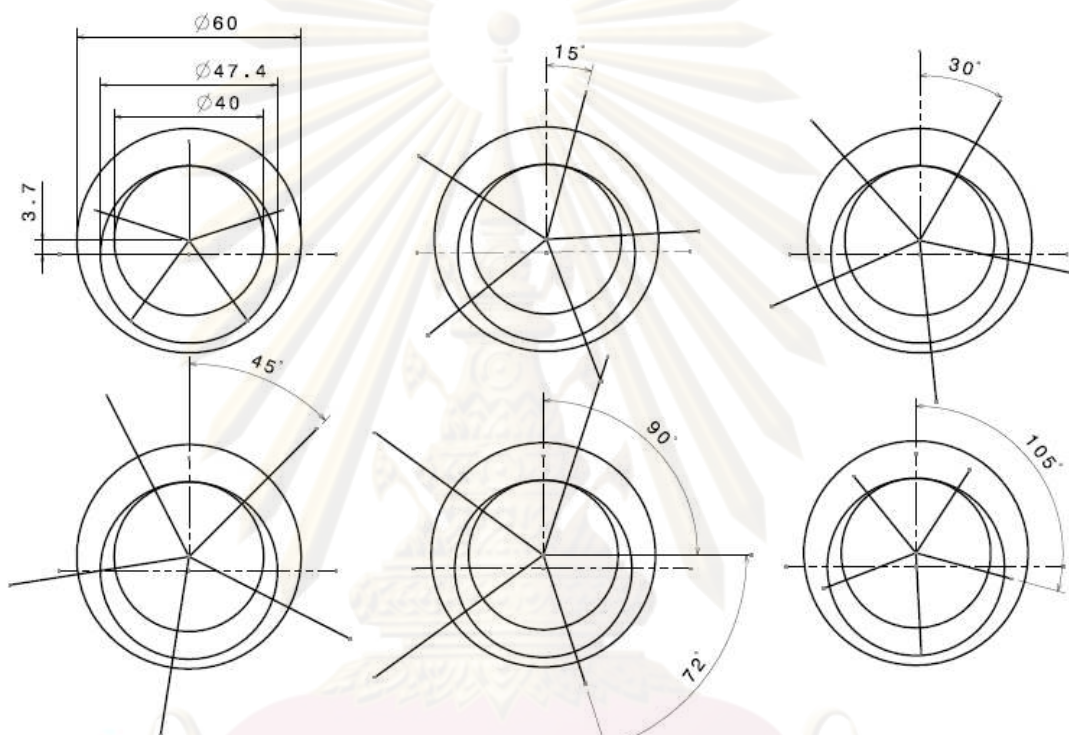
จากการรวมการเปลี่ยนแปลงตลอดการหมุน 180 องศาใบพัดของแกนหมุนจะหมุนจากจุดที่อากาศเข้าจนกระทั่งขยายตัวที่ตำแหน่งมุม A เท่ากับ 180 องศาเพื่อเข้าสู่อุปกรณ์ขยายตัวความดันต่ำต่อไป



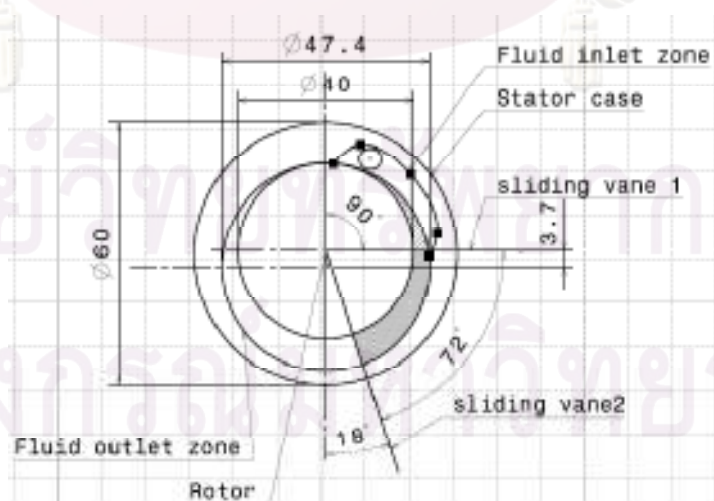
รูปที่ 4-20 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างมุม A มุม B, พื้นที่ที่ใบพัดกวาดและความยาวใบพัดที่เลื่อนออกมาตลอดการหมุนตั้งแต่มุม A เท่ากับ 0 ถึง 180 องศา

4.3.1.2 การประเมินแรงบิดที่เกิดจากอุปกรณ์ขยายตัวความดันสูง

เนื่องจากแกนหมุนของอุปกรณ์ขยายตัวความดันสูงประกอบไปด้วยใบพัดเลื่อนรอบแกนหมุนจำนวน 5 ใบ โดยแต่ละใบทำมุมกัน 72 องศา ซึ่งสามารถกันห้องที่ใช้ในการขยายตัวของลมได้ 5 ห้องดังรูป

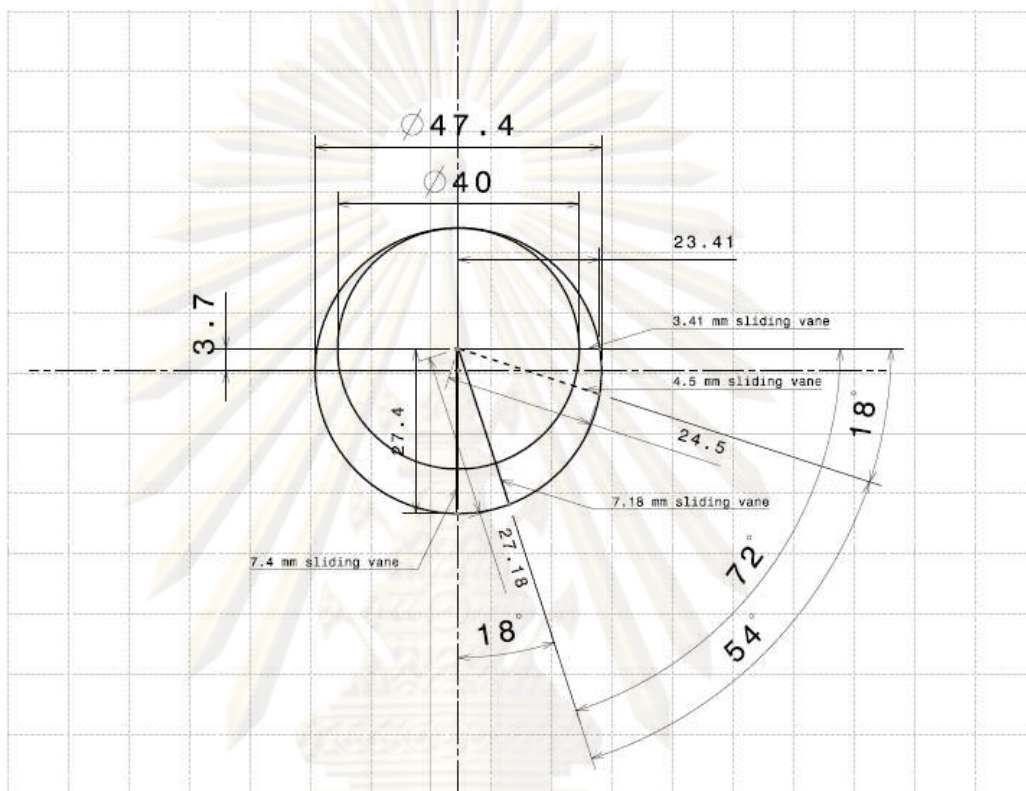


รูปที่ 4-21 ลักษณะของการกันห้องระหว่างแกนหมุนที่มีใบพัดเลื่อนทำมุม 72 องศา กับผิวห้องหมุน



รูปที่ 4-22 ลักษณะของแรงดันที่กระทำกับใบพัดเลื่อนทั้งสองใบระหว่างอากาศเข้าและออก

จากรูปที่ 4-24 แรงที่กระทำบนใบพัดหมุนที่เกิดจากความไม่สมดุลของความดันที่ผิวใบพัดระหว่างการขยายตัวจะส่งผลให้เกิดแรงบิดรอบจุดศูนย์กลางแกนหมุนจากบริเวณที่อากาศไหลเข้าสู่ส่วนที่อากาศไหลออกเป็นมุม 18 องศา ซึ่งแรงบิดจะเกิดจากใบพัดที่เกิดความไม่สมดุลนั้น

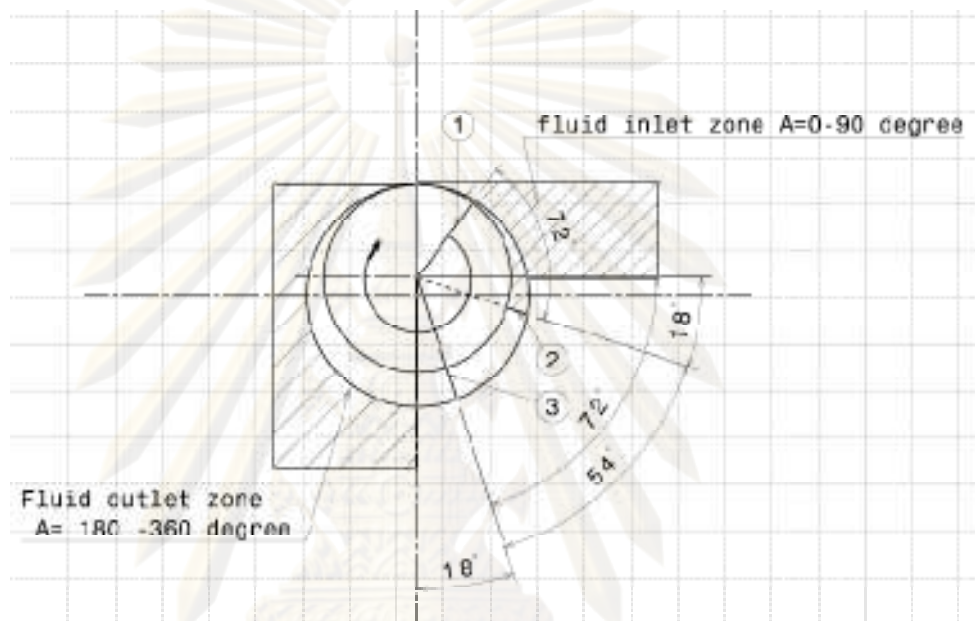


รูปที่ 4-23 ลักษณะทางกายภาพของใบพัดเลื่อนทั้งสองที่สร้างแรงบิดให้กับแกนหมุน

เป็นมุม 18 องศา

จากรูปที่ 4-24 แสดงให้เห็นว่าความดันที่ไม่สมดุลที่เกิดจากใบพัดเลื่อนหมุนส่งผลให้เกิดแรงกระทำที่พื้นผิวใบพัดเลื่อนทั้งสองเป็นมุม 18 องศา และเกิดความไม่สมดุลต่อเนื่องกับใบพัดแรกเป็นมุมอีก 54 องศาซึ่งความดันที่ไม่สมดุลนี้เกิดจากการไหลของของไหลที่ขังอยู่ในห้องที่เชื่อมต่อกับทางเข้าของของไหล เนื่องจากสามารถคำนวณปริมาตรที่เปลี่ยนแปลงภายในแต่ละห้องที่กั้นด้วยใบพัดเลื่อนในส่วนที่เกี่ยวข้องกับการวิเคราะห์ปริมาตรตามมุมมองการหมุนของแกนหมุน จากช่วง initial zone ถึง expansion zone ความยาวห้องหมุนของอุปกรณ์ขยายตัวความดันสูง (stator case) เท่ากับ 52 มิลลิเมตร ดังนั้นปริมาตรภายในช่วง initial zone เท่ากับ 2,062 ลูกบาศก์มิลลิเมตร เนื่องจากของไหลสามารถไหลเข้าสู่ห้องระหว่างใบพัดที่เคลื่อนที่จากมุม A เท่ากับ 0 จนกระทั่งมุม A เท่ากับ 162 องศา ใบพัดเลื่อนที่กั้นไม่ให้ของไหลไหลเข้าเพิ่มอีกอยู่ที่ตำแหน่งมุม A เท่ากับ 90 องศา จากนั้นของไหลที่อยู่ระหว่างใบพัดทั้งสองเป็นมุม 72 องศาจึงเกิดการขยายตัวจนกระทั่งใบพัดเลื่อนใบแรกเคลื่อนที่จากมุม A เท่ากับ 162 เป็น 180 องศาเป็นมุม 18 องศาที่เกิดการขยายตัว

ของของไหลเกิดขึ้นในช่วง expansion zone ซึ่งมีปริมาตรการขยายตัวจาก 8,331 ลูกบาศก์มิลลิเมตร เป็น 9,708 ลูกบาศก์มิลลิเมตร คิดเป็นการขยายตัว 1.17 เท่า เมื่อวิเคราะห์แรงที่กระทำที่ใบพัดจะเกิดที่ใบพัดเลื่อนที่ตำแหน่งมุม A เท่ากับ 90 องศาและใบพัดเลื่อนที่ตำแหน่งมุม A เท่ากับ 162 องศา สองใบพร้อมกันเป็นมุม 18 องศา และเกิดแรงกระทำต่อเนื่องจากการไหลเข้าของของไหลที่ใบพัดที่เคลื่อนที่จากมุม A เท่ากับ 108 องศาเป็นมุม 162 องศาแต่เกิดกับใบพัดเดียวดังนี้



รูปที่ 4-24 ลักษณะของความไม่สมดุลของแรงดันที่กระทำกับใบพัดเลื่อนทั้งสองตลอดช่วงการเกิดแรงบิดรอบแกนหมุนตามเข็มนาฬิกา

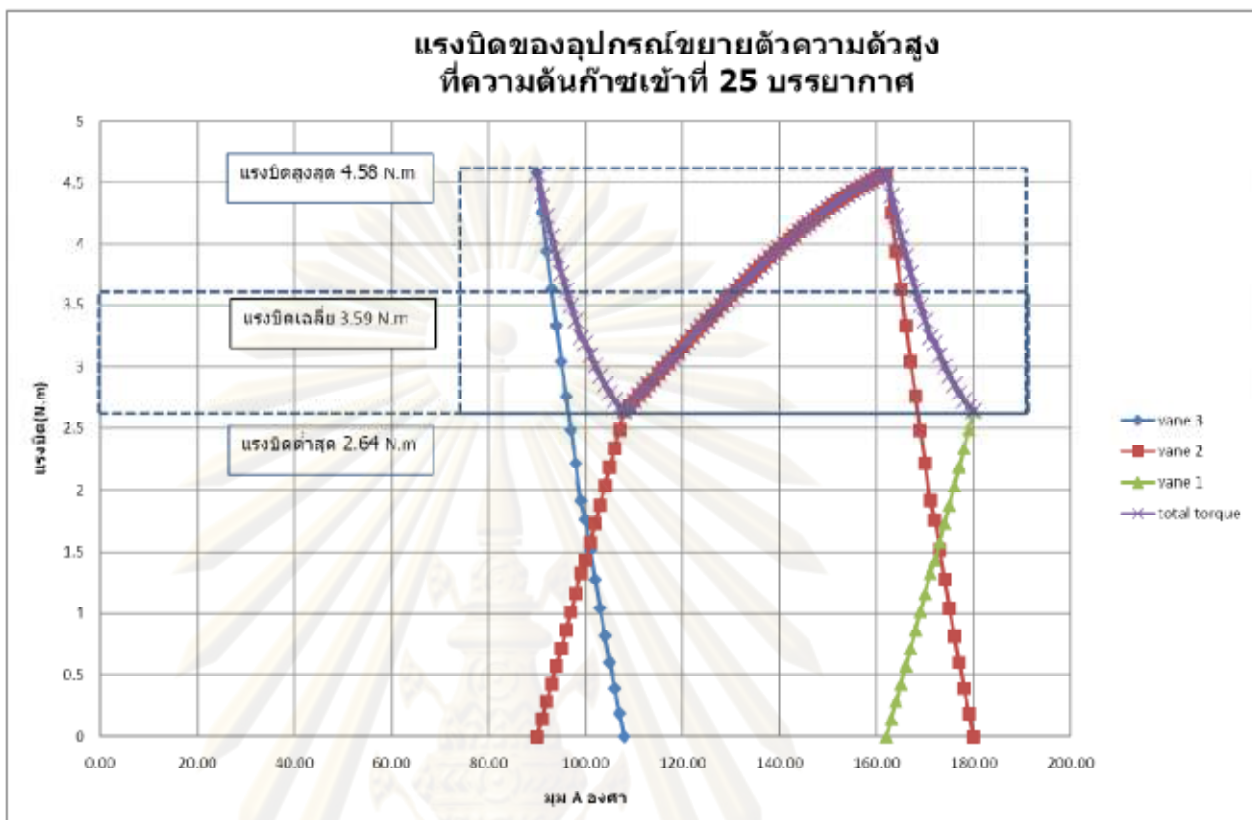
จากรูปที่ 4-24 แรงที่เกิดขึ้นจากความไม่สมดุลเกิดที่ผิวใบพัดเลื่อนใบที่ 2 และ 3 ตามลำดับ โดยของไหลที่มีความดันเท่ากับความดันในช่วง fluid inlet zone จะมีค่ามากกว่าความดันที่ขังอยู่ระหว่างใบพัดที่ 2 และ 3 และในขณะเดียวกันความดันที่อยู่ระหว่างใบที่ 2 และ 3 ก็จะมากกว่าความดันของไหลในช่วง fluid outlet zone ซึ่งจะเกิดขึ้นเป็นมุม 18 องศา ภายหลังจากที่ใบพัดเลื่อนที่ 3 เคลื่อนที่ถึงมุม A เท่ากับ 180 องศา ความไม่สมดุลของความดันจะเกิดเฉพาะผิวใบพัดเลื่อนที่ 2 ที่ความดันจาก fluid inlet zone และ fluid outlet zone ต่อเนื่องเป็นมุม 54 องศา จากมุม A เท่ากับ 108 องศา ถึง 162 องศา จนกระทั่งใบพัดเลื่อนที่ 1 เคลื่อนที่ถึงตำแหน่งมุม A เท่ากับ 90 องศาซึ่งจะเกิดผลต่างความดันดังนี้ (สมมุติความดันเข้าเท่ากับ 2.5 MPa)

ตาราง 4.1 การขยายตัวของของไหลในช่วงใบพัดเคลื่อนที่ 2 และ 3 ระหว่างมุม A ตั้งแต่ 90-108 องศา
ของอุปกรณ์ขยายตัวความดันสูง (2.5 MPa)

มุม A ของใบพัดเคลื่อนที่ 2 (องศา)	ปริมาตรที่อยู่ระหว่าง ใบพัด เคลื่อนที่ 2 และ 3 (mm ³)	ความดันที่อยู่ระหว่าง ใบพัด (Mpa) ขยายตัวด้วยขบวนการ Polytropic			
		n = 1.4	n = 1.3	n = 1.2	n = 1.1
90	8331.31	2.50	2.50	2.50	2.50
91	8417.05	2.46	2.47	2.47	2.47
92	8502.65	2.43	2.43	2.44	2.44
93	8587.36	2.40	2.40	2.41	2.42
94	8671.14	2.36	2.37	2.38	2.39
95	8753.97	2.33	2.34	2.36	2.37
96	8835.82	2.30	2.32	2.33	2.34
97	8916.64	2.27	2.29	2.30	2.32
98	8996.41	2.25	2.26	2.28	2.30
99	9085.17	2.21	2.23	2.25	2.27
100	9132.93	2.20	2.22	2.24	2.26
101	9209.28	2.17	2.19	2.22	2.24
102	9284.44	2.15	2.17	2.20	2.22
103	9358.35	2.12	2.15	2.17	2.20
104	9430.99	2.10	2.13	2.15	2.18
105	9502.32	2.08	2.11	2.13	2.16
106	9572.32	2.06	2.09	2.12	2.15
107	9640.94	2.04	2.07	2.10	2.13
108	9708.15	2.02	2.05	2.08	2.11

จากตาราง 4.1 ทำให้ทราบว่าความดันที่เปลี่ยนแปลงภายในห้องใบพัดที่ 2 และ 3 โดยการสมมุติ
ขบวนการการขยายตัวเป็น Polytropic $n=1.3$ เพื่อการคำนวณหาแรงบิดจากผลต่างความดันที่กระทำ
กับผิวใบพัดเคลื่อนที่ตั้งแต่ใบพัดเคลื่อนที่ 2 เคลื่อนที่จากมุม A = 90 องศา ถึง 180 องศา ดังนี้

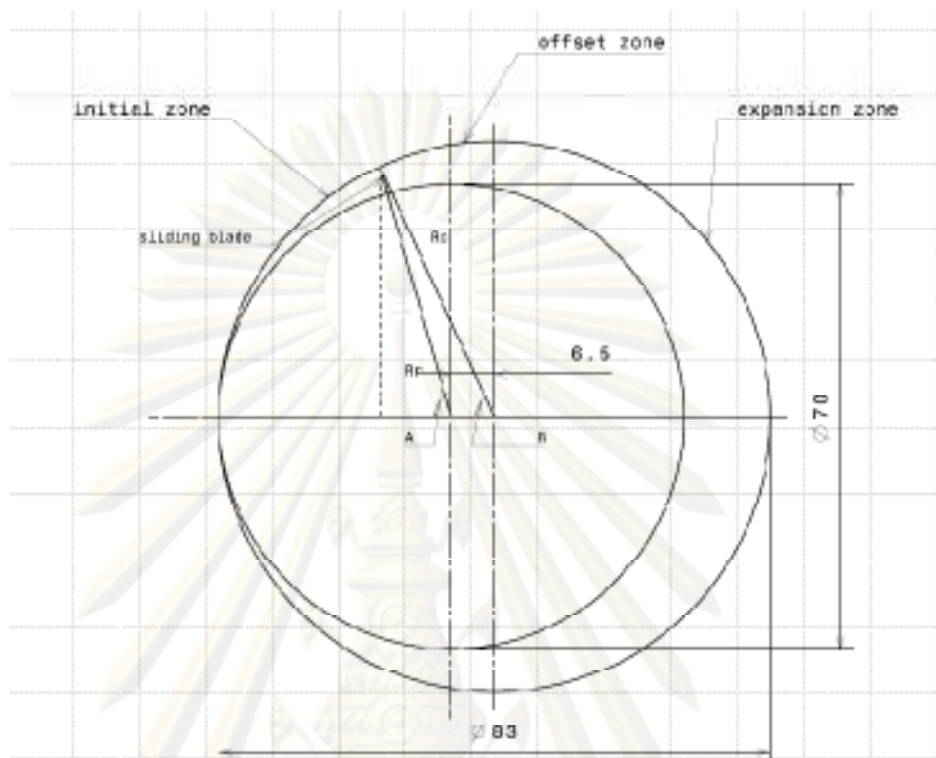
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4-25 กราฟแรงบิดที่ได้สูงสุดของอุปกรณ์ขยายตัวความดันสูง

ระหว่างใบพัดเลื่อนที่ 2 เคลื่อนที่อยู่ระหว่างมุม A เท่ากับ 90 -108 องศา แรงบิดจะเกิดจากใบพัดเลื่อนที่ 2 และใบพัดเลื่อนที่ 3 ที่อยู่ที่มุม A เท่ากับ 162 – 180 องศา รวมกัน จนกระทั่งใบพัดเลื่อนที่ 2 เคลื่อนที่ผ่านมุม A เท่ากับ 108 – 162 องศา แรงบิดจะเกิดจากใบพัดเลื่อนที่ 2 ใบเดียวจากการไหลของของไหลเมื่อผ่านมุม A ที่ 162 องศา แรงบิดจะเกิดจากใบพัดเลื่อนที่ 2 และใบพัดเลื่อนที่ 1 ซึ่งเคลื่อนที่มายังตำแหน่งมุม A เท่ากับ 90 องศา – 108 องศา แรงบิดจะเกิดจากใบพัดเลื่อนที่ 2 และใบพัดเลื่อนที่ 1 ซึ่งแรงบิดเฉลี่ยที่ได้จากการคำนวณเมื่อของไหลไหลเข้าที่ ความดัน 25 บรรยากาศเท่ากับ 3.59 นิวตัน.เมตร

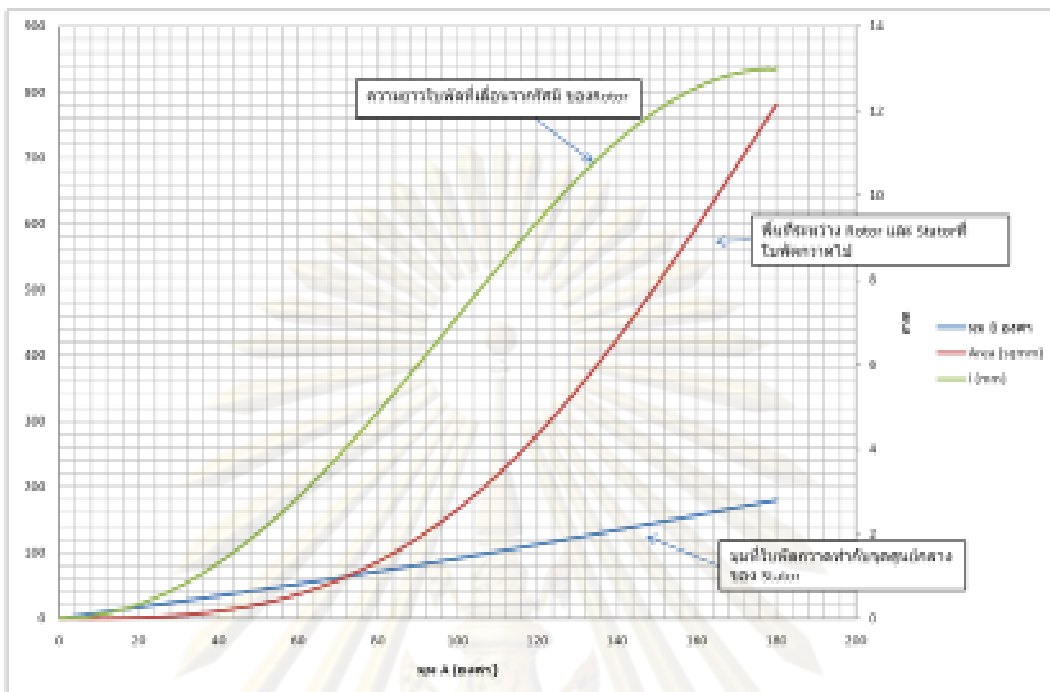
4.3.1.3 การวิเคราะห์เชิงปริมาตรของอุปกรณ์ขยายตัวความดันขั้นต่ำ (Low state Expander)



รูปที่ 4-26 ลักษณะรูปตัดขวางของอุปกรณ์ขยายตัวความดันขั้นต่ำ

เนื่องจากลักษณะทางกายภาพเหมือนกับอุปกรณ์ขยายตัวความดันสูงยกเว้นขนาดที่ใหญ่กว่าดังภาพดังนั้นการพิสูจน์ความสัมพันธ์ของทั้งสามช่วงจะมีลักษณะคล้ายกันซึ่งจะละไว้จากการรวมการเปลี่ยนแปลงตลอดการหมุน 180 องศาใบพัดของแกนหมุนจะหมุนจากจุดที่อากาศเข้าจนกระทั่งขยายตัวที่ตำแหน่งมุม A เท่ากับ 180 องศาเพื่อเข้าสู่บรรยากาศต่อไป

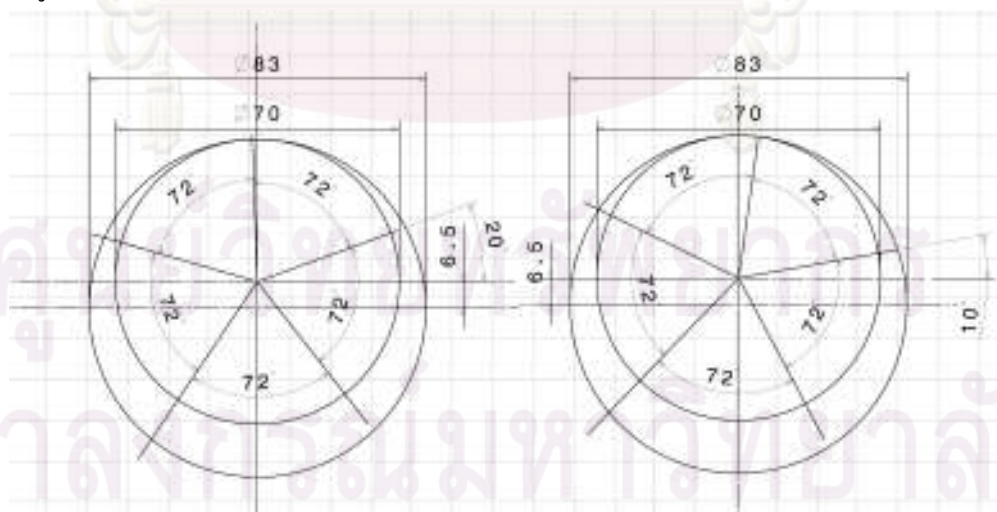
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4-27แสดงความสัมพันธ์ระหว่างมุม A มุมB, พื้นที่ที่ใบพัดกวาดและความยาวใบพัดที่เลื่อนออกมาตลอดการหมุนตั้งแต่มุม A เท่ากับ 0 ถึง 180 องศาของอุปกรณ์ขยายความดันต่ำ

4.3.1.4 การประเมินแรงบิดที่เกิดจากอุปกรณ์ขยายตัวความดันต่ำ

เนื่องจากแกนหมุนของอุปกรณ์ขยายตัวความดันสูงประกอบไปด้วยใบพัดเลื่อนรอบแกนหมุนจำนวน 5 ใบ โดยแต่ละใบทำมุมกัน 72 องศา ซึ่งสามารถกันห้องที่ใช้ในการขยายตัวของลมได้ 5 ห้องดังรูป



รูปที่ 4-28ลักษณะของการกันห้องระหว่างแกนหมุนที่มีใบพัดเลื่อนทำมุม 72 องศา

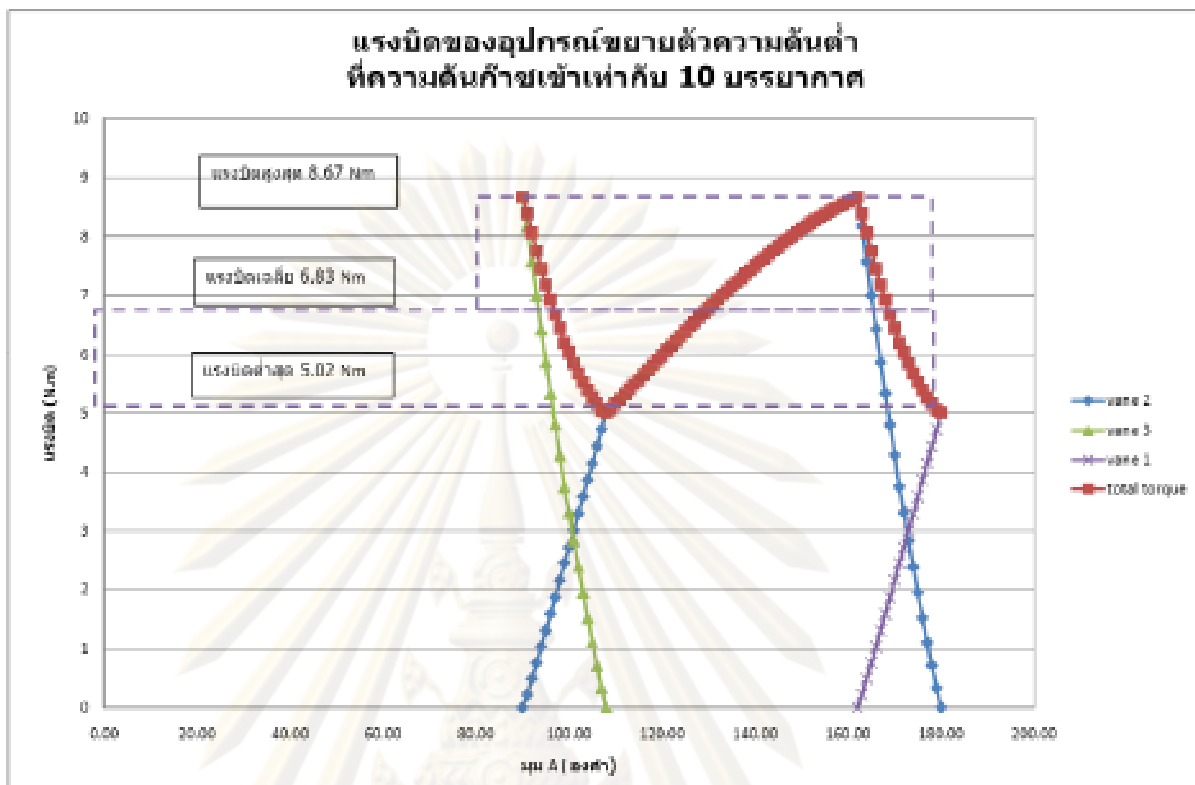
กับผิวห้องหมุน

ตาราง 4.2 การขยายตัวของของไหลในช่วงใบพัดเคลื่อนที่ 2 และ 3 ระหว่างมุม A ตั้งแต่ 90-108 องศา ของอุปกรณ์ขยายตัวความดันต่ำ (1 MPa)

มุม A ของ ใบพัดเคลื่อนที่ 2 (องศา)	ปริมาตรที่อยู่ระหว่าง ใบพัดเคลื่อนที่ 2 และ 3 (mm ³)	ความดันที่อยู่ระหว่างใบพัด (Mpa) ขยายตัวด้วยขบวนการ Polytropic			
		n = 1.4	n = 1.3	n = 1.2	n = 1.1
90	39326.45	1.00	1.00	1.00	1.00
91	39732.43	0.99	0.99	0.99	0.99
92	40137.72	0.97	0.98	0.98	0.98
93	40538.79	0.96	0.96	0.96	0.97
94	40935.50	0.95	0.95	0.95	0.96
95	41327.63	0.93	0.94	0.94	0.95
96	41715.15	0.92	0.93	0.93	0.94
97	42097.88	0.91	0.92	0.92	0.93
98	42475.51	0.90	0.91	0.91	0.92
99	42885.03	0.89	0.90	0.90	0.91
100	43215.06	0.88	0.89	0.89	0.90
101	43576.61	0.87	0.88	0.88	0.89
102	43932.45	0.86	0.87	0.88	0.89
103	44282.43	0.85	0.86	0.87	0.88
104	44626.40	0.84	0.85	0.86	0.87
105	44964.18	0.83	0.84	0.85	0.86
106	45295.61	0.82	0.83	0.84	0.86
107	45620.54	0.81	0.83	0.84	0.85
108	45938.83	0.80	0.82	0.83	0.84

จากตาราง 4.2 ทำให้ทราบว่าความดันที่เปลี่ยนแปลงภายในห้องใบพัดที่ 2 และ 3 โดยการสมมุติ ขบวนการการขยายตัวเป็น Polytropic $n=1.3$ เพื่อการคำนวณหาแรงบิดจากผลต่างความดันที่กระทำ กับผิวใบพัดเคลื่อนตั้งแต่ใบพัดเคลื่อนที่ 2 เคลื่อนที่จากมุม A = 90 องศา ถึง 180 องศา ดังนี้

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

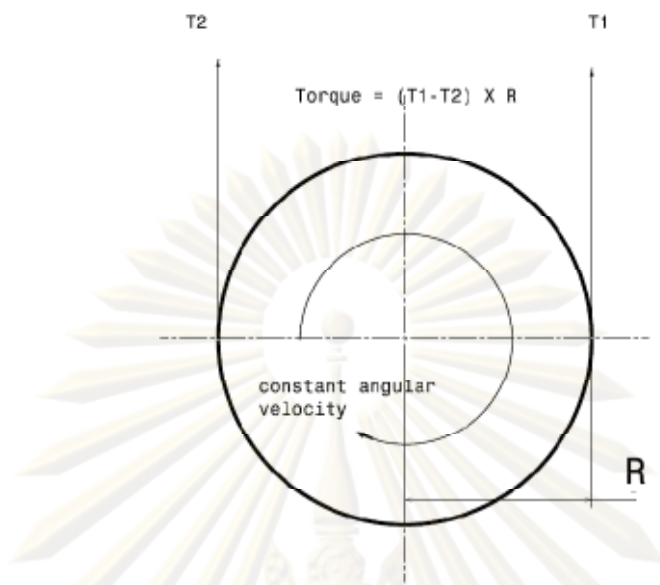


รูปที่ 4-29 กราฟแรงบิดที่ได้สูงสุดของอุปกรณ์ขยายตัวความดันต่ำ

ลักษณะการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพรวมถึงสมมุติฐานที่ใช้ เช่นเดียวกับอุปกรณ์ขยายตัวความดันสูงทุกประการ ซึ่งแรงบิดเฉลี่ยที่ได้จากการคำนวณเมื่อของของไหลไหลเข้าที่ ความดัน 10 บรรยากาศเท่ากับ 6.83 นิวตัน.เมตร

4.4 การออกแบบอุปกรณ์วัดกำลังเครื่องยนต์

เนื่องจากกำลังงานที่ได้จากเครื่องยนต์ที่ออกแบบสามารถแบ่งส่วนประกอบได้เป็นสองส่วนหลัก คือ 1) แรงบิดที่ได้ 2) ความเร็วรอบที่เกิดขึ้นเมื่อมีภาระ โดยเบื้องต้นจากการคำนวณหาแรงบิดสูงสุดที่ได้สามารถประมาณการช่วงการวัดได้ อย่างไรก็ตามเนื่องจากไม่ทราบแน่ชัดว่าความเร็วรอบที่ได้จะมีค่าประมาณเท่าใด ดังนั้นการเลือกใช้เครื่องผลิตกระแสไฟฟ้ากระแสตรงหรือ Generator จึงมีความเสี่ยงที่จะต้องแก้แบบภายหลัง ประกอบกับราคาของ Generator มีราคาแพงจึงพิจารณาออกแบบอุปกรณ์ที่สามารถวัด Break Power โดยตรง โดยอาศัยแรงเสียดทานที่เกิดขึ้นที่ผิวรอกที่รูคาร์ซีมี ดังรูป



รูปที่ 4-30 ลักษณะอุปกรณ์ที่ใช้วัดแรงบิดของเครื่องยนต์

จากสมการ

$$T_1 = T_2 e^{\mu_k \beta} \dots\dots\dots [7]$$

โดยที่ T_1 = แรงดึงของเชือกที่สัมผัสรอกในทิศทางที่สวนการหมุน

T_2 = แรงดึงของเชือกที่สัมผัสรอกในทิศทางตามการหมุน

μ_k = สัมประสิทธิ์แรงเสียดทานจลน์ระหว่างพื้นผิวรอกกับเชือก

β = มุมที่เชือกสัมผัสกับผิวรอก (rad)

และแรงบิดที่เกิดจากภาวะนี้จะมีค่า แรงบิด = $(T_1 - T_2) \cdot R$

อย่างไรก็ตามแรงบิดที่เกิดจากภาวะที่ตั้งขึ้นสามารถปรับจากความดึงของเชือกด้านที่หมุน ทิศทางตามการหมุนและความเร็วรอบที่หมุนนั้นจะใช้เครื่องวัดความเร็วรอบแบบดิจิตอล โดยใช้ ออปโตแบสสะท้อนกลับมี resolution เท่ากับ 25 rpm ดังนั้นจึงสามารถคำนวณหา Break power ณ จุดที่สนใจได้

บทที่ 5

การสร้างและการติดตั้งอุปกรณ์

5.1 ขั้นตอนการประกอบอุปกรณ์

5.1.1 การประกอบชุดอุปกรณ์ขยายตัวความดันสูง

5.1.2 การประกอบชุดอุปกรณ์ขยายตัวความดันต่ำ

5.1.3 การประกอบชุดวัดแรงบิด

5.1.4 การประกอบชุดวัดความเร็วรอบ

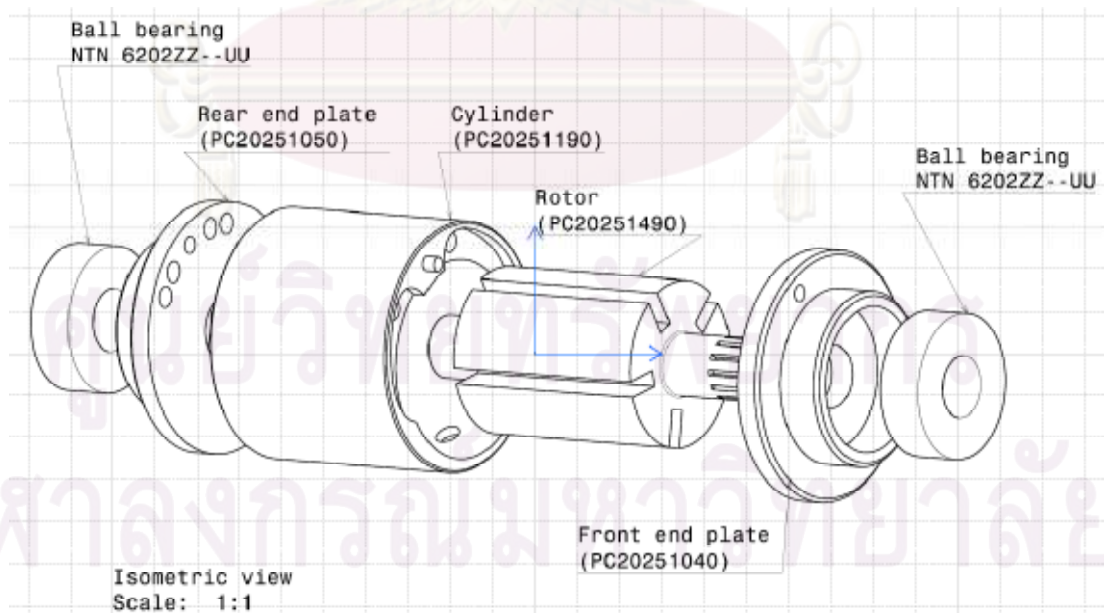
5.2 ขั้นตอนการติดตั้งอุปกรณ์

5.2.1 การติดตั้งอุปกรณ์ขยายตัวความดันสูงบนฐาน

5.2.2 การติดตั้งอุปกรณ์ขยายตัวความดันต่ำบนฐาน

5.2.3 การติดตั้งอุปกรณ์การวัดและระบบท่อของระบบ

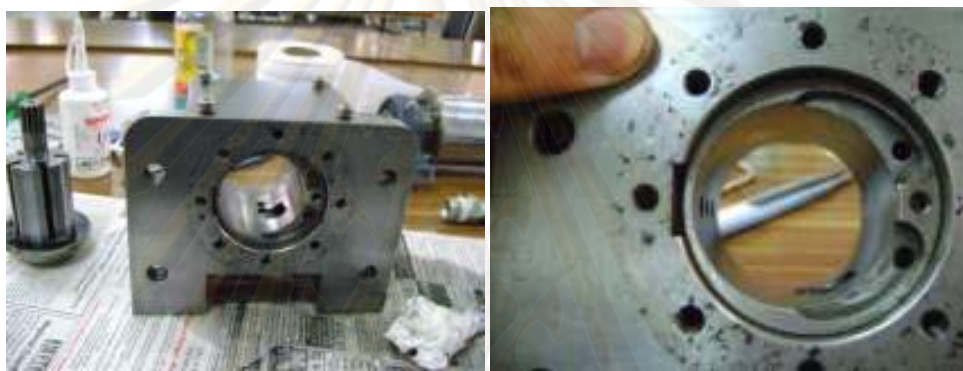
5.1.1 การประกอบชุดอุปกรณ์ขยายตัวความดันสูง



รูปที่ 5-1 การประกอบห้องใบพัดเลื่อนของอุปกรณ์ขยายตัวความดันสูง

1 เริ่มจากนำRotor (PC20251490) ใ้ผ่าน Rear end plate (PC20251050) และ Ball Bearing NTN 6202ZZ ตามรูปโดย tolerance ระหว่างเพลากับรูในของBearing จะเป็นแบบ fit ซึ่งสามารถปรับระยะประชิดของหน้าแปลนกันผิวของRotor ได้ โดยจะต้องตั้งระยะให้Rotor สามารถหมุนได้สะดวกแต่จะต้องไม่มีระยะห่างจนกระทั่งไม่สามารถกั้นลมระหว่างการหมุนได้

2 นำ Cylinder (PC 20251190) สวมลงใน Main case high pressure โดยระยะความลึกที่ใส่ลงไปจะต้องมีขนาดใหญ่กว่าความหนาของ Front end plate (PC 20251040) เล็กน้อย และตำแหน่งของช่องลมต่างๆต้องตรงกัน ดังรูป



รูปที่ 5-2การประกอบ Cylinder (PC 20251190) สวมลงใน Main case high pressure

3 นำชุดที่ประกอบแล้วในข้อที่ 1 สวมตามตำแหน่งโดยสอดมาจากทางด้านหลังของ Cylinder โดยดูระดับความเสมอกันของผิว Rotor กับผิวหน้าของ Cylinderให้เท่ากัน และยังคงสามารถหมุนได้โดยไม่ติดขัด ภายหลังชะโลมผิวที่มีการสัมผัสกันด้วยน้ำมันจักร ดังรูป



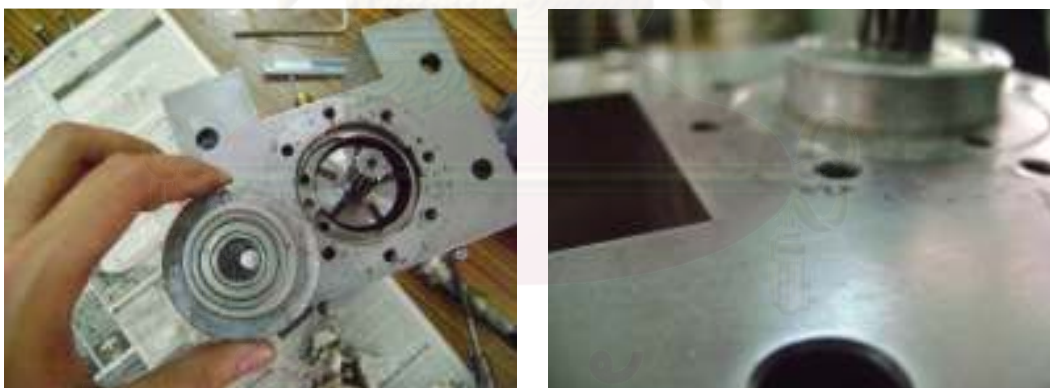
รูปที่ 5-3การประกอบชุดประกอบ Rotor กับชุดประกอบ Main case high pressure

4 นำใบพัดเคลื่อนที่สะอาดใส่ลงไปตามช่องของแกน Rotor โดยการหมุนแกนมาที่ตำแหน่ง Expansion zone แล้วค่อยๆใส่ทีละใบ โดยระดับของผิวใบพัดให้เสมอกับผิวของ Cylinder ดังรูป



รูปที่ 5-4การใส่ใบพัดเคลื่อนที่ภายในช่องของแกน Rotor สำหรับอุปกรณ์ขยายตัวความดันสูง

5 เมื่อใส่ใบพัดภายในช่องแกน Rotor เรียบร้อยแล้วพิจารณาการหมุนของแกนอีกครั้งหนึ่ง แล้วจึงนำ Front end plate (PC 20251040) มาปิดลงตามตำแหน่งของช่องที่เจาะบนผิวของCylinder เมื่อใส่แล้วให้สังเกตดูว่าการหมุนของ Rotor ติดขัดหรือไม่ โดยระดับของผิวหน้า Front end Plate จะต้องอยู่ในระนาบเดียวกับผิวของ Main case high pressure แต่ถ้าการหมุนติดขัดแสดงว่าการตั้งระยะในข้อที่ 1 ไม่เหมาะสมจำเป็นจะต้องทำการตั้งระยะประชิดในข้อที่ 1 ใหม่ ดังรูป



รูปที่ 5-5การประกอบ Front end plate กับ Main case high pressure

6 ภายหลังจากการประกอบ Front end plate แล้วจึงทำความสะอาดผิวหน้าด้วย สารละลายน้ำมัน แล้วจึงวางแผ่นประเก็นให้ตรงตามตำแหน่งของรูน็อต และปิดฝา FBC1 ตามตำแหน่งดังรูป



รูปที่ 5-6 การประกอบประกien และการวางฝา FBC1 กับ Main case high pressure

7 ทำการขันน็อต M6 ตามตำแหน่ง โดยการขันจะขันให้นือตอยู่ในตำแหน่งทุกตัวก่อนแล้วจึงจะขันแน่น โดยขันแน่นนือตตัวตรงข้ามกันก่อน จนครบหมดทุกตัวแล้วจึงดูการหมุนของเพลลาอีกครั้งหนึ่ง ว่ายังกงหมุนด้วยอาการติดขัดหรือไม่ ถ้ามีการติดขัดอาจจะต้องคลายนือตบางตัวบ้าง แล้วจึงขันแน่นใหม่อีกครั้ง ดังรูป



รูปที่ 5-7 การขันนือตปิด FBC1 และการปรับแต่งเพื่อให้เพลลาหมุนได้สะดวก

8 เมื่อปิด FBC 1 และขันนือตทุกตัวแน่นแล้วจึงนำ BBCP1 มาขันนือตรวมกับ BBC 1 แล้วทำการใส่ประกien ทองแดงและนำประกien เหลวทาขอบบ่าที่ใช้กดแผ่น Rear end plate เพื่อไม่ให้เกิดการรั่วของของไหลก่อนไหลเข้าสู่ห้องหมุน และไม่เป็นการกด Rear end plate จนแน่นเกินไปจนกระทั่งเพลลา Rotor หมุนแบบติดขัด โดยค่อยๆ นำค้อนยางตอกลงไป โดยตำแหน่งของช่องทางการไหลจะต้องตรงกัน ดังรูป



รูปที่ 5-8 การประกอบ BBCP1 และ BBC1 เพื่อปิดฝาหลังของอุปกรณ์ขยายตัว

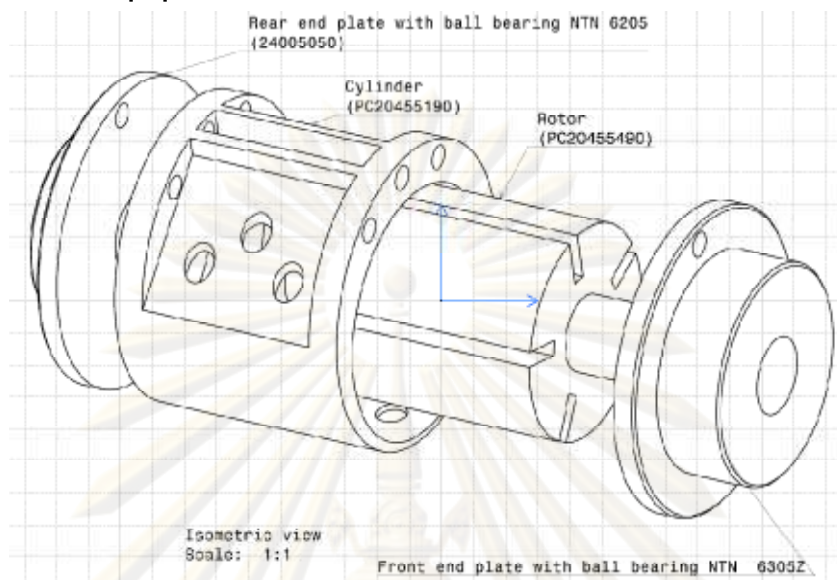
9 ทำการขันน็อตปิดฝา BBC 1 ให้แน่นทุกตัว และสังเกตการหมุนของ Rotor ว่าจะต้องไม่ติดขัด



รูปที่ 5-9 การขันน็อตเพื่อปิดฝา BBC1 ของอุปกรณ์ขยายตัวความดันสูง

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

5.1.2 การประกอบชุดอุปกรณ์ขยายตัวความดันต่ำ



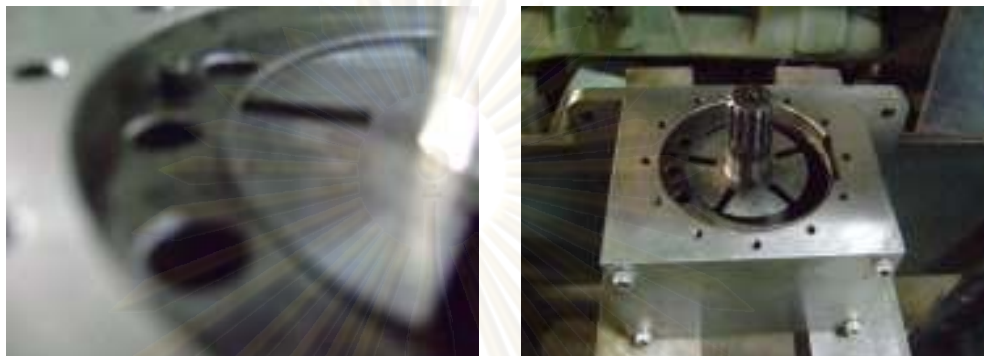
รูปที่ 5-10 การประกอบห้องใบพัดเลื่อนของอุปกรณ์ขยายตัวความดันต่ำ

1 ลักษณะการประกอบห้องขยายตัวความดันต่ำมีลักษณะคล้ายคลึงกับห้องขยายตัวความดันสูง โดยเริ่มจากการนำ Cylinder (PC20455190) อัดใส่ลงใน Main case low pressure โดยระดับความลึกของผิวหน้า Cylinder ลึกมากกว่าความหนาของแผ่น Front end plate เล็กน้อย และตำแหน่งของช่องลมจะต้องตรงกัน ดังรูป



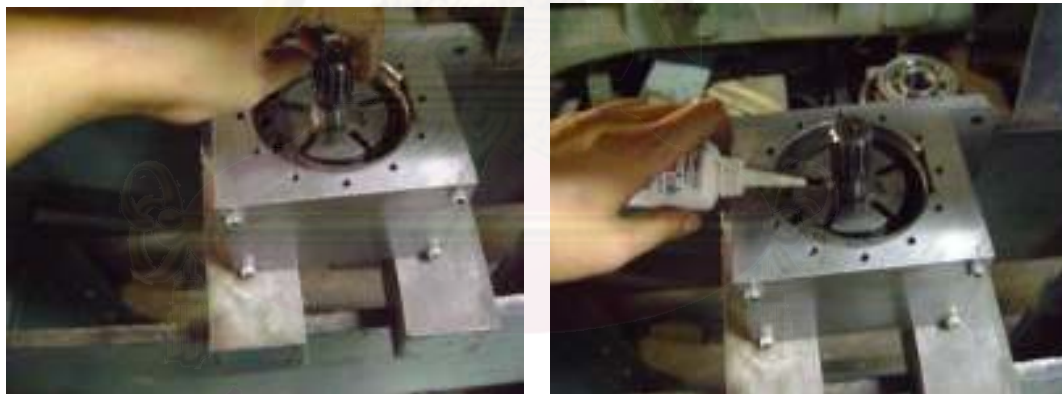
รูปที่ 5-11 การประกอบ Cylinder กับ Main case low pressure

2 นำชุดประกอบ Rear end plate (24005050) กับแกน Rotor สอดทางด้านหลังของ Cylinder และใช้เครื่องอัดไฮโดรริกอัด ชุดประกอบเข้ากับตำแหน่งของพิน จนกระทั่งผิวหน้าของ Rotor อยู่ในระดับเดียวกันกับ ผิวหน้าของ Cylinder ดังรูป



รูปที่ 5-12 การประกอบชุดประกอบ Rotor กับ Main case low pressure

3 ทำความสะอาดผิวหน้าของ Cylinder และ ผิวหน้า Rotor โดยทดลองหมุนแกน Rotor ด้วยซึ่งจะต้องไม่มีอาการติดขัด และชะโลมน้ำมันจักรลงไปตามส่วนที่มีการสัมผัสกันของผิว Rotor และผิว Cylinder



รูปที่ 5-13 การเตรียมผิวหน้าก่อนการปิดแผ่น Front end plate

4 นำใบพัดเลื่อนที่ทำความสะอาดแล้วค่อยๆ ไล่ตามตำแหน่งช่องของแกน Rotor โดยการหมุนแกนมาที่ตำแหน่ง Expansion zone แล้วค่อยๆ ไล่ทีละใบ โดยดูระดับของผิวใบพัดให้เสมอกับผิวของ Cylinder ดังรูป



รูปที่ 5-14 การใส่ใบพัดเลื่อนภายในช่องของแกน Rotor สำหรับอุปกรณ์ขยายตัวความดันต่ำ 5 นำแผ่น Front end plate ใส่ลงตามตำแหน่งของพินและกดด้วยเครื่องอัดไฮโดรริก โดยให้แกนเพลลา ยังคงหมุนได้โดยสะดวก ดังรูป



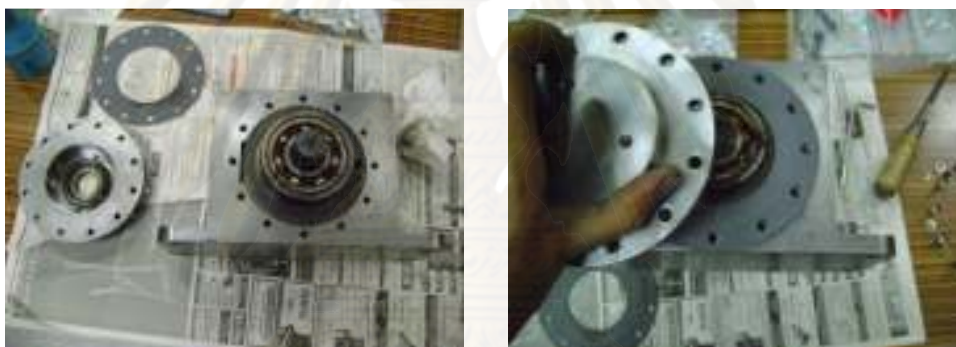
รูปที่ 5-15 การใส่ Front end plate กับ Main case low pressure ในตำแหน่งพิน 6 ภายหลังการติดตั้ง Front end plate สังเกตดูผิวหน้าของ Front end plate จะต้องอยู่ระดับเดียวกับ Main case low pressure แล้วจึงนำค้อนค่อยๆ ทบตามแนวแกน Rotor เพื่อให้แกนเพลลาสามารถหมุนได้สะดวกขึ้น ดังรูป

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 5-16 การใส่ Front end plate และการปรับแต่งการหมุนของ Rotor

7 เมื่อประกอบ Front end plate และ Rear end plate แล้วจึงนำประเก็นที่มีรูตามรูของน็อตและช่องของ Bearing และชั้นน็อตปิดฝา FBC2 และ BBC2 ดังรูป



รูปที่ 5-17 การประกอบประเก็นและฝา FBC2 และ BBC2 ของอุปกรณ์ขยายตัวความดันต่ำ

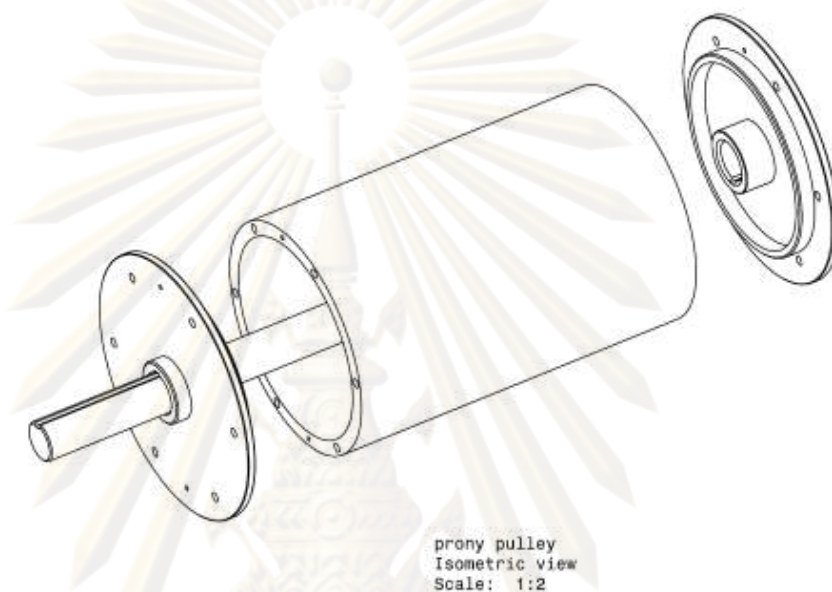
8 ทำการขันน็อตปิดฝา BBC2 และ FBC2 ให้แน่นทุกตัว และสังเกตการหมุนของ Rotor ว่าจะต้องไม่ติดขัด



รูปที่ 5-18 การขันน็อตปิดฝา FBC2 และ BBC 2

5.1.3 การประกอบชุดวัดแรงบิด

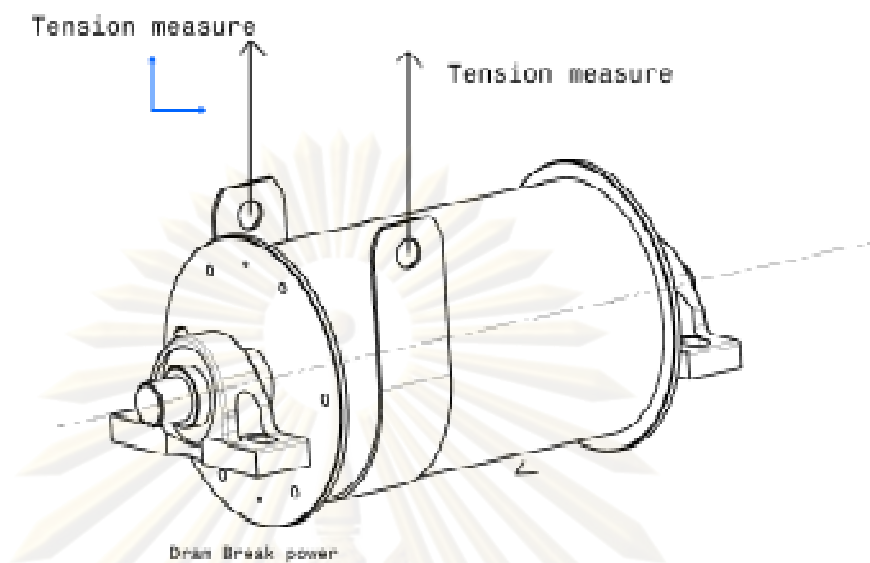
ชุดอุปกรณ์วัดแรงบิดที่สร้างขึ้นจะมีลักษณะคล้ายลูกกรอก 2 ขนาดที่มีรัศมีต่างกัน 2 เท่า คือ 37.5 มิลลิเมตร สำหรับอุปกรณ์ขยายตัวความดันสูง และ 75 มิลลิเมตรสำหรับอุปกรณ์ขยายตัวความดันต่ำ



รูปที่ 5-19 ลักษณะการประกอบรอกที่ใช้ในการวัดแรงบิดที่เกิดจากอุปกรณ์ขยายตัวของของไหล

โดยเพลลาที่ใช้ประกอบรอกจะสอดผ่านฝาปิดทั้งข้างหน้าและข้างหลังและใช้สลักลิมนขนาด 5 มิลลิเมตรในการส่งกำลังจากเพลลาสู่ผิวรอก โดยจุดรองรับเพลลาจะเลือกใช้ Bearing ของ SKF รุ่น SYJ 505 ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางรูใน 1 นิ้ว ซึ่งจะต้องประกอบกับสายหนังที่ปรับแรงเสียดทานที่ผิวของรอกได้

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 5-20 ลักษณะการประกอบรอกที่ใช้ในการเพิ่มภาระให้กับอุปกรณ์ขยายตัวของของไหล



รูปที่ 5-21 ลักษณะการประกอบรอกเพื่อวัดแรงบิด

5.1.4 การประกอบชุดวัดความเร็วรอบ

การวัดความเร็วรอบของเพลลาที่หมุนจะเลือกใช้เครื่องวัดความเร็วรอบแบบดิจิตอลรุ่น MX 019 โดยใช้อุปกรณ์แบบสะท้อนกลับมี Resolution เท่ากับ 25rpm โดยคุณสมบัติของอุปกรณ์เป็นดังนี้

- 1) ใช้ไฟเลี้ยง 12 Volt DC
- 2) สามารถวัดความเร็วรอบได้ตั้งแต่ 25 -15,000 รอบ/นาที

3) แสดงผลด้วย LED display 5 หลัก

4) สามารถวัดความเร็วรอบโดยใช้ซอฟต์แวร์แบบสะท้อนกลับได้

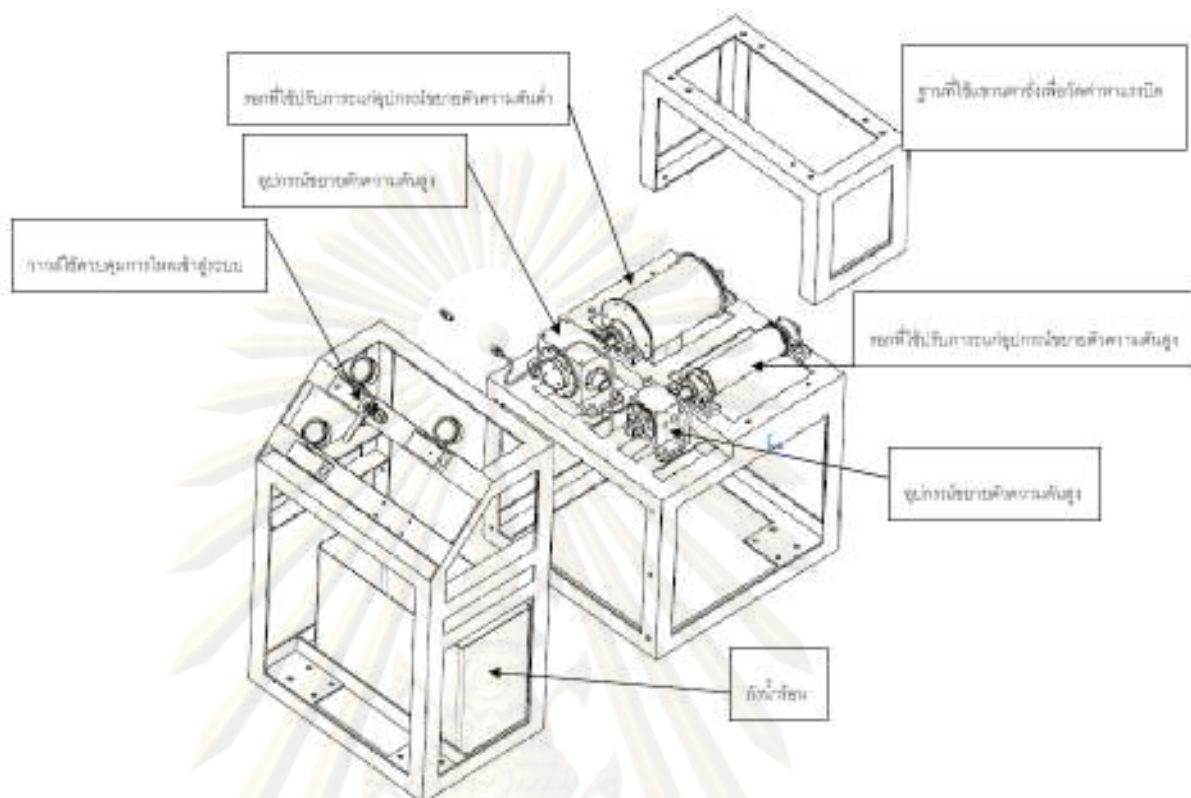


รูปที่ 5-22 ลักษณะการประกอบเครื่องวัดความเร็วรอบแบบดิจิตอลรุ่น MX 019

5.2 ขั้นตอนการติดตั้งอุปกรณ์

การติดตั้งอุปกรณ์ขยายตัวความดันสูงและขยายตัวความดันต่ำเข้ากับอุปกรณ์ที่ใช้สร้างภาระจะเชื่อมต่อเพลาคด้วย Coupling ที่สามารถติดตั้งเชิงศูนย์ได้เล็กน้อย และ ข้อต่อระหว่างอุปกรณ์ขยายตัวทั้งสองและถึงความดันสูงจะใช้สายไฮดรอลิกอุตสาหกรรมในการเชื่อมต่อ ส่วนอุปกรณ์การวัดอุณหภูมิจะใช้ thermocouple type K เป็นหลัก, อุปกรณ์วัดความดันจะใช้เกจแบบ Bourdon tube และ ใช้ pressure transducer แบบ strain gauge ของ Omega dyne inc range 0- 5000 Psi เพื่อวัดความดันที่เหลือภายในถึงความดันสูงและใช้ Data logger ของ Fluke รุ่น Hydra data logger ในการบันทึกข้อมูล

ศูนย์วิทยุทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



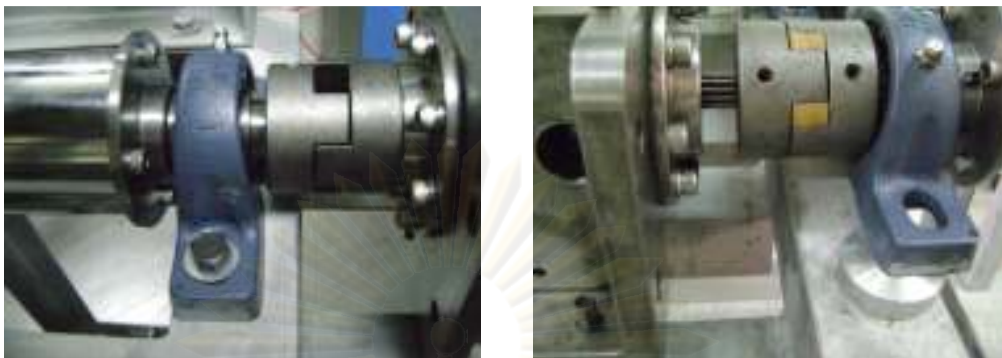
รูปที่ 5-23 ตำแหน่งของอุปกรณ์ที่ติดตั้งบนฐานที่ใช้ในการทดสอบ

5.2.1 การติดตั้งอุปกรณ์ขยายตัวความดันสูงบนฐาน

นำชุดอุปกรณ์ขยายตัวความดันสูงติดตั้งตามรูปที่ 5-24 โดยระดับความสูงของแท่นที่รองรับอุปกรณ์สามารถปรับสูง-ต่ำได้ ในขณะเดียวกันระดับของเพลารอกกับเพลาลงของอุปกรณ์ขยายตัวความดันสูงจะต้องอยู่ในระดับเดียวกันด้วย



รูปที่ 5-24 แท่นที่ใช้ปรับสูงต่ำของอุปกรณ์ขยายตัวความดันสูง



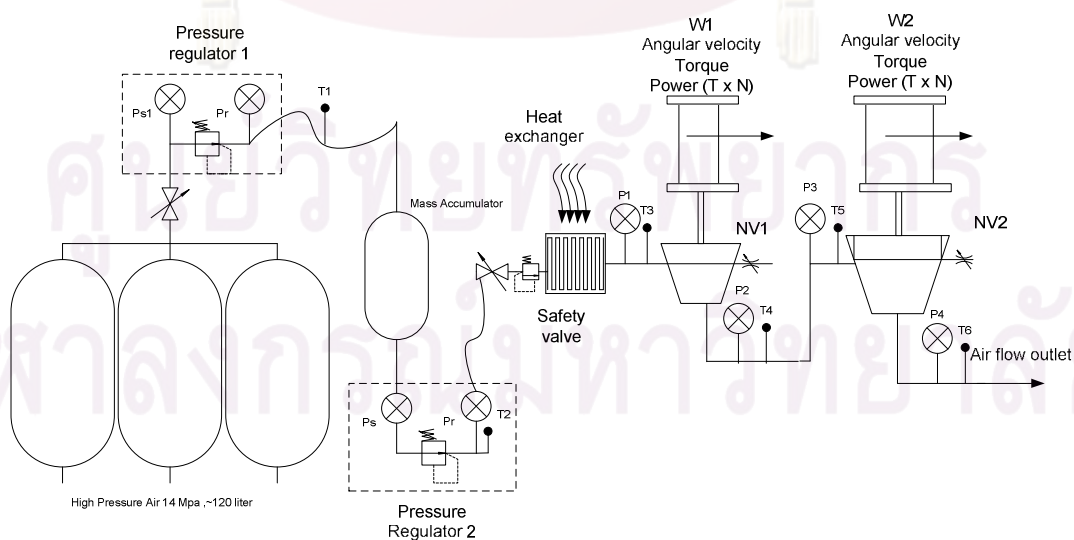
รูปที่ 5-25 ติดตั้ง coupling เพื่อเชื่อมรอกกับอุปกรณ์ขยายตัวความดันสูง

เมื่อนำอุปกรณ์ขยายตัวความดันสูงเข้าในตำแหน่งแล้วต้องมีการปรับแต่งแนวแกนก่อน เพื่อให้การหมุนเป็นไปอย่างไม่มีติดขัดก่อนขึ้นน็อตยึดแทนให้แน่น

5.2.2 การติดตั้งอุปกรณ์ขยายตัวความดันต่ำบนฐาน

นำชุดอุปกรณ์ขยายตัวความดันต่ำติดตั้งตามรูปที่ 5-23 โดยระดับความสูงของแท่นที่รองรับอุปกรณ์จะเป็นอลูมิเนียมกลึงมาให้ได้ระดับแนวแกนเพลากับระดับเพลารอก ลักษณะการติดตั้งคล้ายคลึงกับอุปกรณ์ขยายตัวความดันสูง

5.2.3 การติดตั้งอุปกรณ์การวัดและระบบท่อ



รูปที่ 5-26 แสดงค่าตัวแปรต่างๆ ที่วัดและบันทึกค่าโดย Data logger

ติดตั้ง thermocouple type K ตามแผนผังตั้งรูปและติดตั้ง Pressure transducer ที่หัวถังความดันสูง เพื่อวัดค่า Ps1 หรือความดันที่เหลือภายในถัง



รูปที่ 5-27 อุปกรณ์ที่ใช้วัดและบันทึกค่าอุณหภูมิ, ความดัน

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 6

การเก็บข้อมูลและการวิเคราะห์ผลการทดลอง

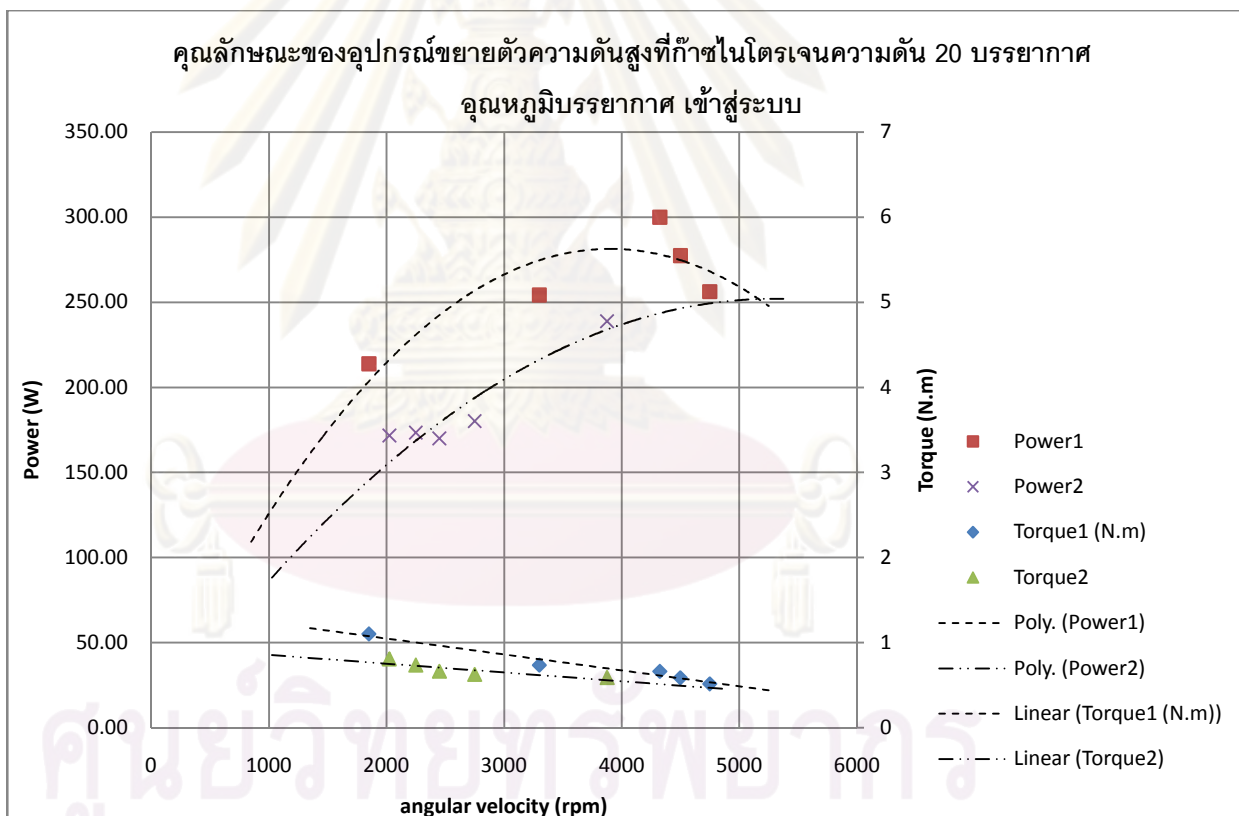
การเก็บข้อมูลกำลังงานกลที่ได้จากอุปกรณ์ขยายตัวของของไหล
ขั้นตอนการเตรียมเก็บข้อมูล

- 1) เริ่มเปิดเครื่องวัดความเร็วรอบ
- 2) เริ่มเปิด Heater ที่ใช้ต้มน้ำเพื่ออุ่นก๊าซก่อนเข้าอุปกรณ์ขยายตัว
- 3) ตรวจสอบคุณภาพของข้อต่อ
- 4) ตรวจสอบคุณภาพโดยรวมก่อนการเปิดวาล์วความดัน
- 5) ปิดวาล์วของ Pressure Regulator 1 ให้สุด (ก๊าซจะไม่ไหล)
- 6) เปิดวาล์วหัวถังความดันทั้งสามใบ
- 7) เปิดวาล์ว Pressure Regulator 1 ที่ความดันก่อนเข้าอุปกรณ์ขยายตัวโดยบวกเพิ่มอีกประมาณ 5 บรรยากาศ (ตั้งอยู่ระหว่าง 25 – 40 บรรยากาศ)
- 8) เมื่อเกจที่ใช้อ่านความดันของ Pressure Regulator 1 นิ่งแล้วจึงเริ่มเปิด Pressure Regulator 2 ที่ความดันทดสอบ (20- 35 บรรยากาศ)
- 9) เปิดอุปกรณ์บันทึกค่า data logger เพื่อเตรียมการบันทึกค่า
- 10) ตั้งความตึงของตราซึ่งที่จะใช้ในการเพิ่มภาระให้กับอุปกรณ์โดยเริ่มจากความตึงน้อยไปมาก
- 11) เมื่อตรวจสอบความเรียบร้อยของอุปกรณ์ทั้งหมดครบถ้วนแล้วจึงเริ่มจับเวลาต่อหนึ่งภาระใช้เวลา 120 วินาที ในขณะที่ data logger บันทึกค่าทุกๆ 2 วินาที
- 12) เมื่อทำการทดสอบที่ภาระนี้แล้วจึงปิดวาล์วที่ควบคุมการไหลและทำการตั้งความตึงของตราซึ่งที่จะใช้ในการเพิ่มภาระให้กับอุปกรณ์ที่ค่ามากขึ้น
- 13) โดยปกติการทดสอบที่ความดันเริ่มต้นที่ 140 บรรยากาศ ปริมาตรประมาณ 120ลิตร จะสามารถทำการทดลองได้ประมาณ 5 ครั้งครั้งละ 120 วินาที

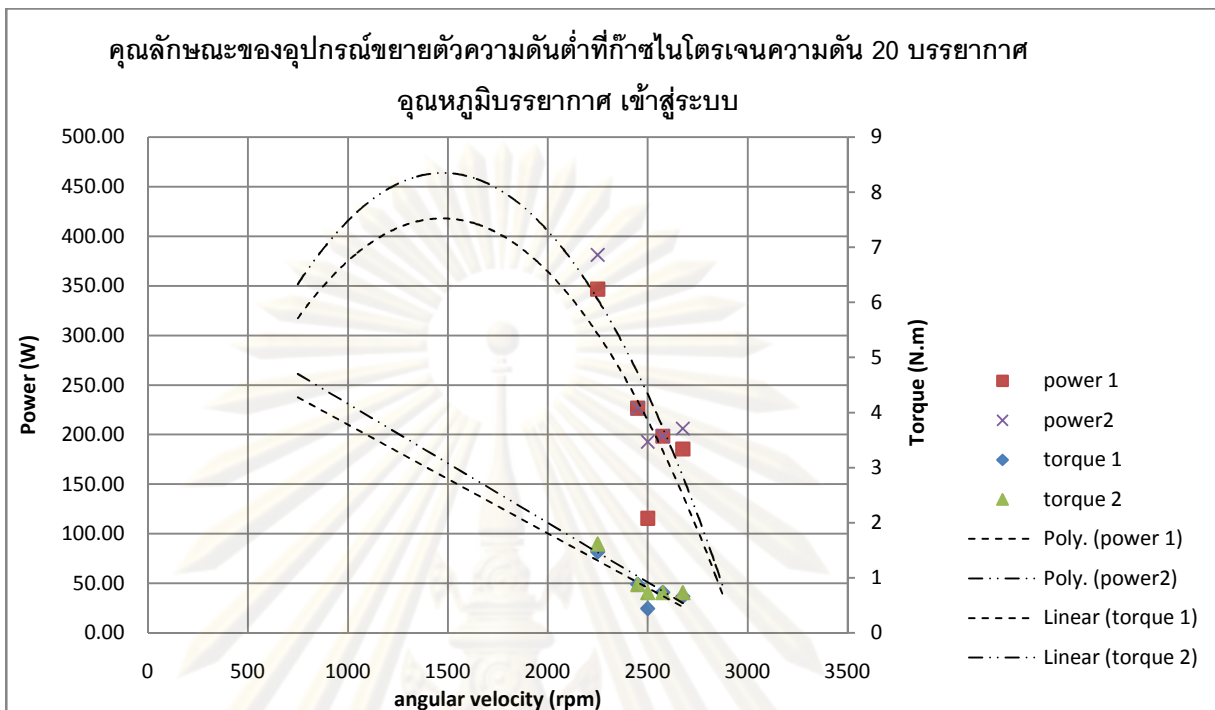
6.1 ผลการทดลอง

การทดลองจะเริ่มจากความดัน 20 ,25 ,30 และ35 บรรยากาศตามลำดับ

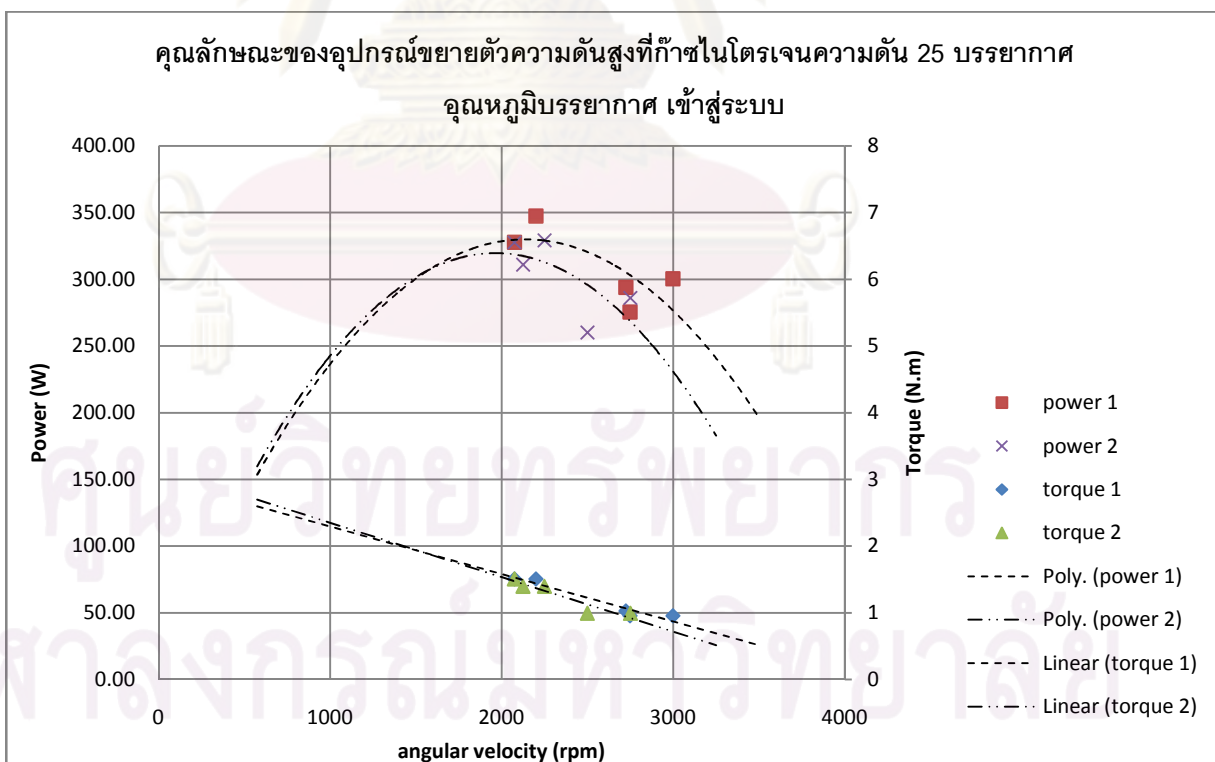
ผลการทดลองที่ได้เมื่อให้ภาระแก่อุปกรณ์ขยายตัวและจ่ายก๊าซในโตรเจนอัดความดัน จะได้แรงบิดและความเร็วรอบของเพล่าที่ไม่คงที่มากนัก ดังนั้นจึงนำผลของแรงบิดและความเร็วรอบที่ได้มาหาเส้นแนวโน้มเพื่อทำนายผลที่ได้จากเครื่องยนต์นอกช่วงการทดลอง โดยการทดลองแต่ละครั้งจะได้แรงบิดและความเร็วรอบของทั้งอุปกรณ์ขยายตัวความดันสูงและต่ำพร้อมกัน ซึ่งในแต่ละค่าความดันและภาระทดสอบจะทำการทดลองสองครั้ง โดยผลการทดลองกำลังและแรงบิดสำหรับการทดลองครั้งแรก คือ (Power 1, Torque 1) และผลการทดลองกำลังและแรงบิดสำหรับการทดลองครั้งที่สอง คือ (Power 2, Torque 2) โดยนำมาวาดเส้นกราฟดังนี้



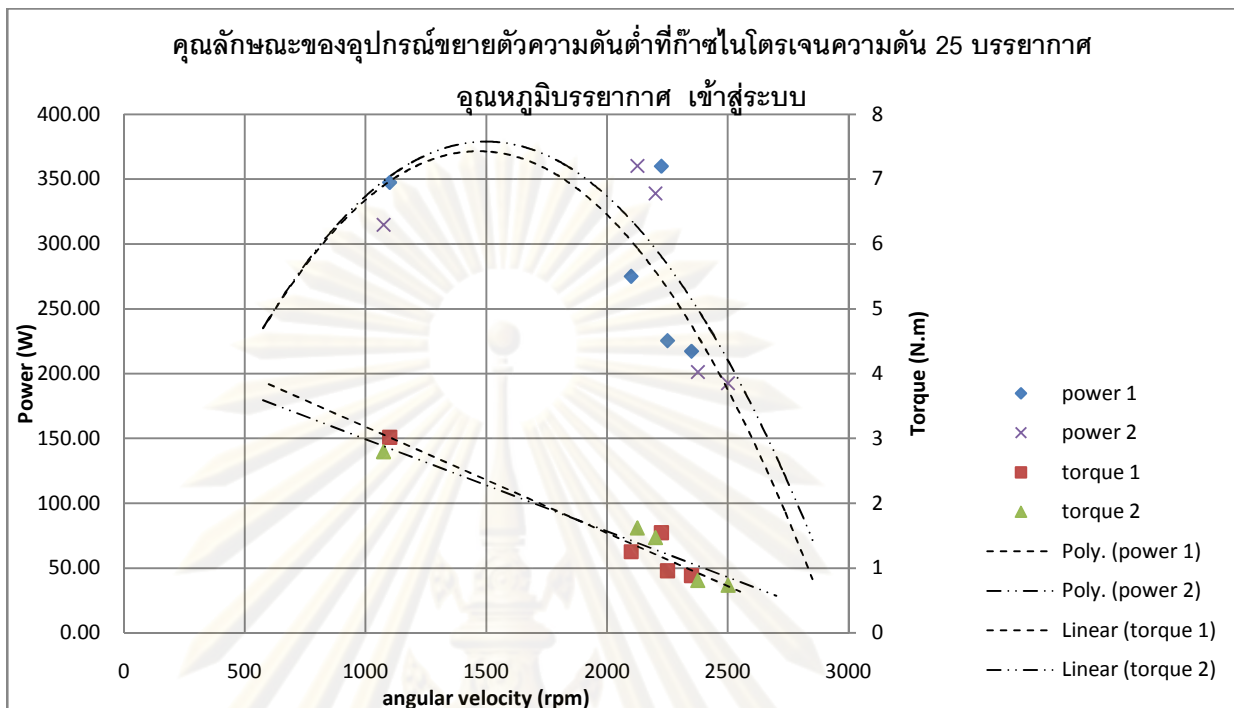
รูปที่ 6-1 สมรรถนะของอุปกรณ์ขยายตัวความดันสูงที่ก๊าซไนโตรเจนความดัน 20 บรรยากาศ
อุณหภูมิห้อง



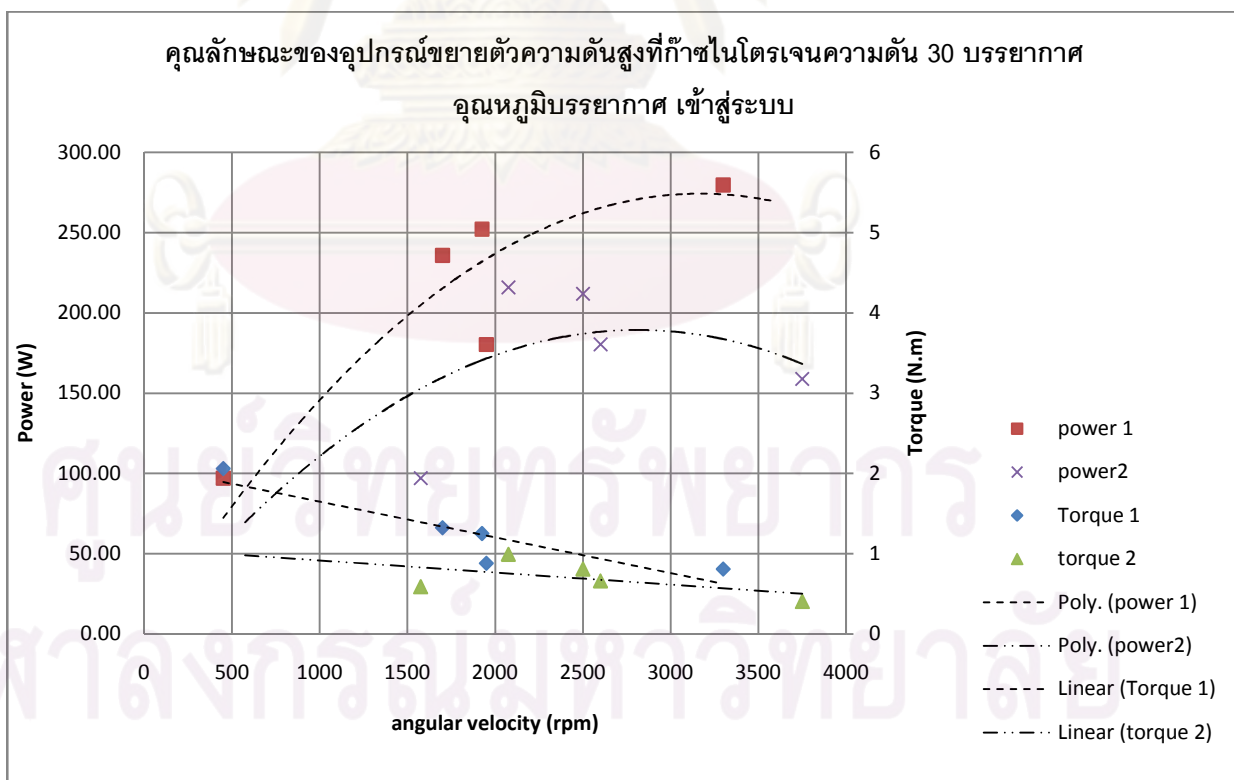
รูปที่ 6-2 สมรรถนะของอุปกรณ์ขยายตัวความดันต่ำที่ก๊าซไนโตรเจนความดัน 20 บรรยากาศ อุณหภูมิห้อง



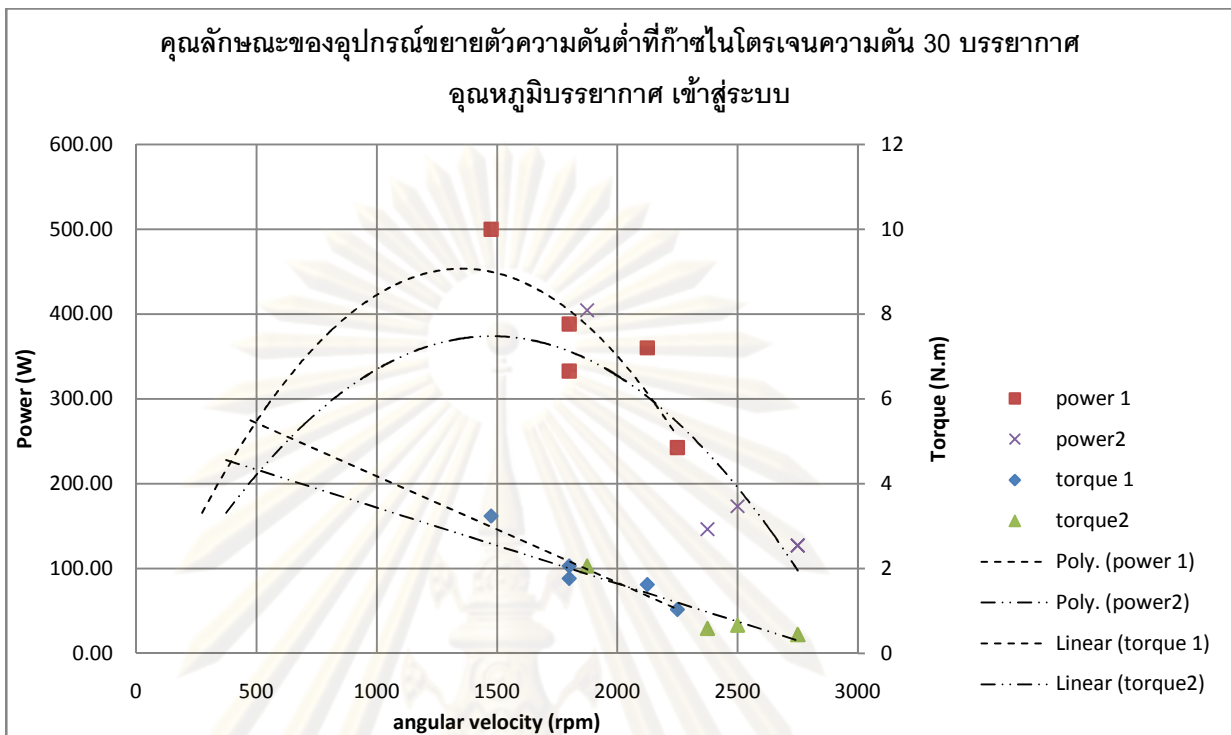
รูปที่ 6-3 สมรรถนะของอุปกรณ์ขยายตัวความดันสูงที่ก๊าซไนโตรเจนความดัน 25 บรรยากาศ อุณหภูมิห้อง



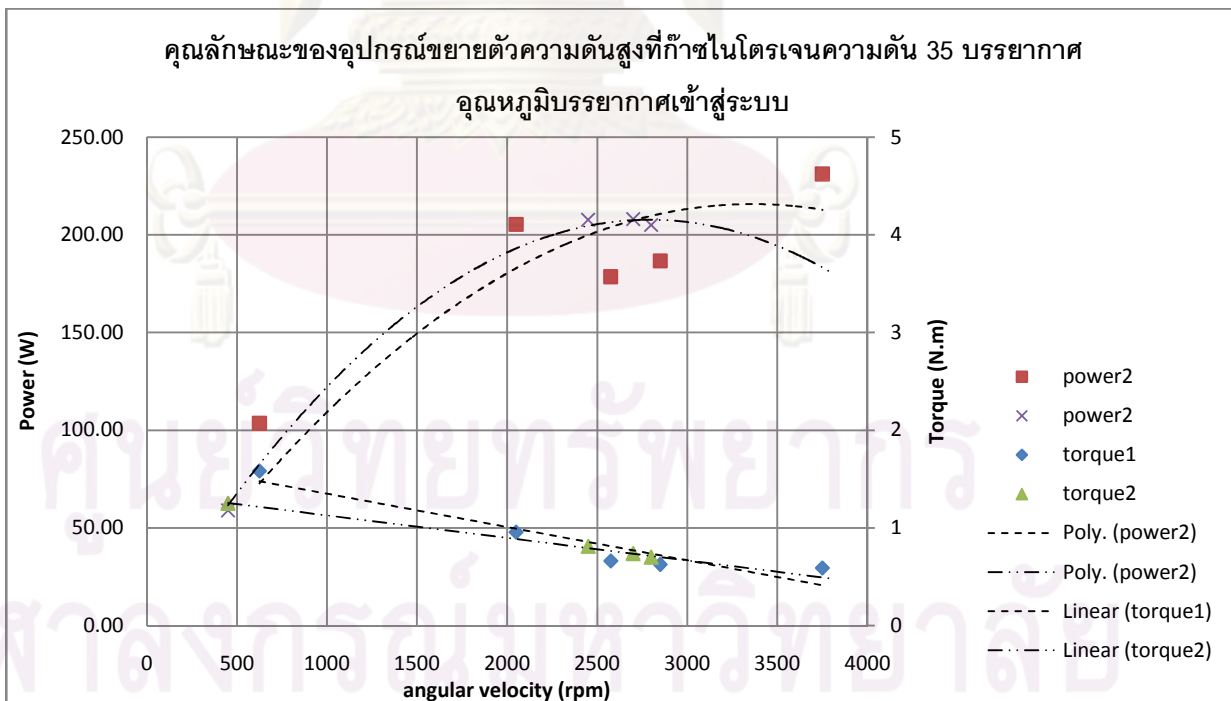
รูปที่ 6-4 สมรรถนะของอุปกรณ์ขยายตัวความดันต่ำที่ก๊าซไนโตรเจนความดัน 25 บรรยากาศ
อุณหภูมิห้อง



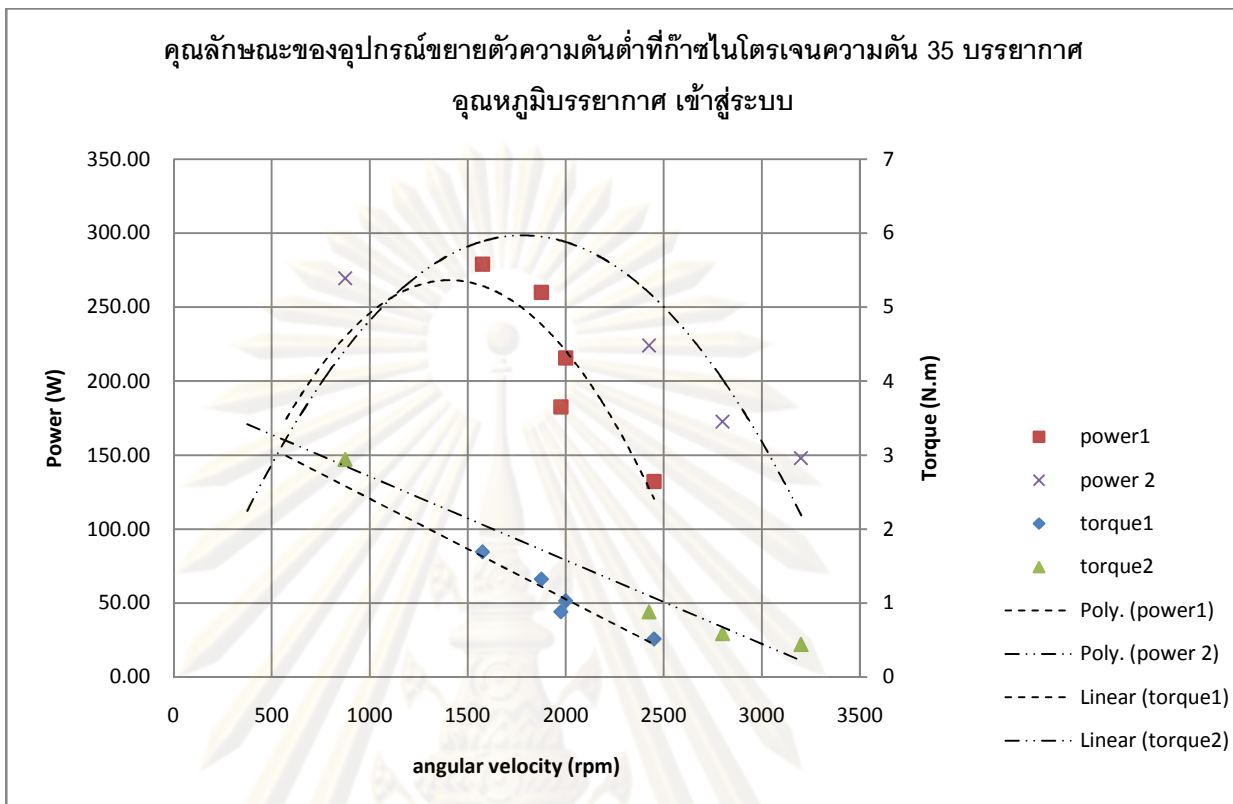
รูปที่ 6-5 สมรรถนะของอุปกรณ์ขยายตัวความดันสูงที่ก๊าซไนโตรเจนความดัน 30 บรรยากาศ
อุณหภูมิห้อง



รูปที่ 6-6 สมรรถนะของอุปกรณ์ขยายตัวความดันต่ำที่ก๊าซไนโตรเจนความดัน 30 บรรยากาศ
 อุณหภูมิห้อง



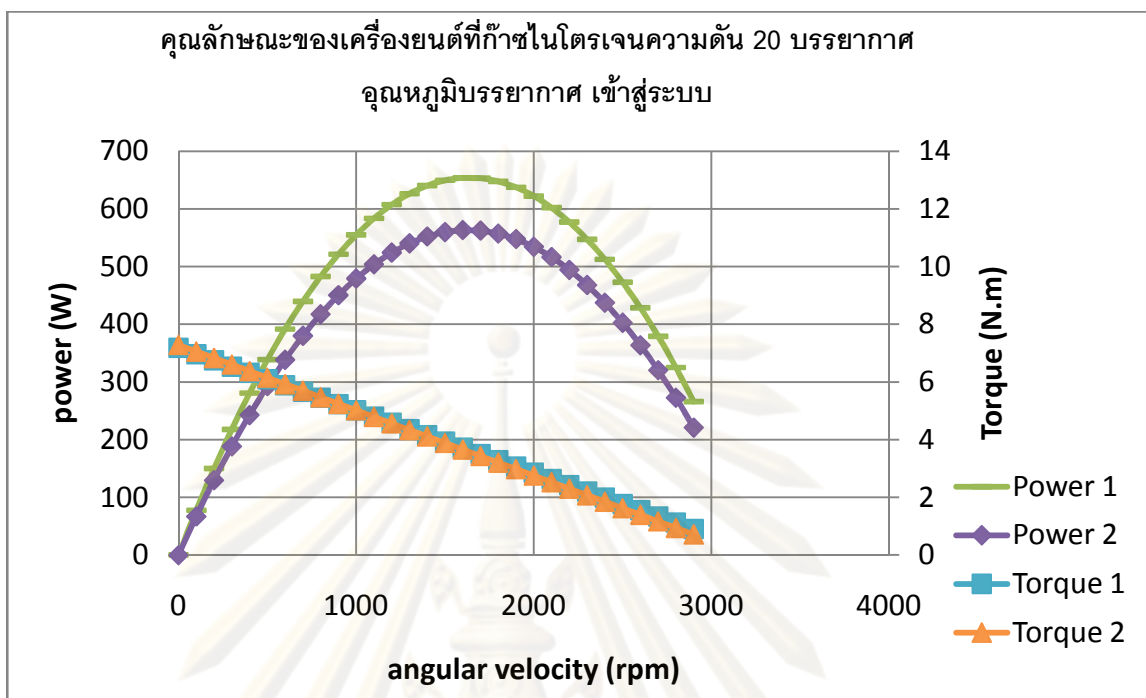
รูปที่ 6-7 สมรรถนะของอุปกรณ์ขยายตัวความดันสูงที่ก๊าซไนโตรเจนความดัน 35 บรรยากาศ
 อุณหภูมิห้อง



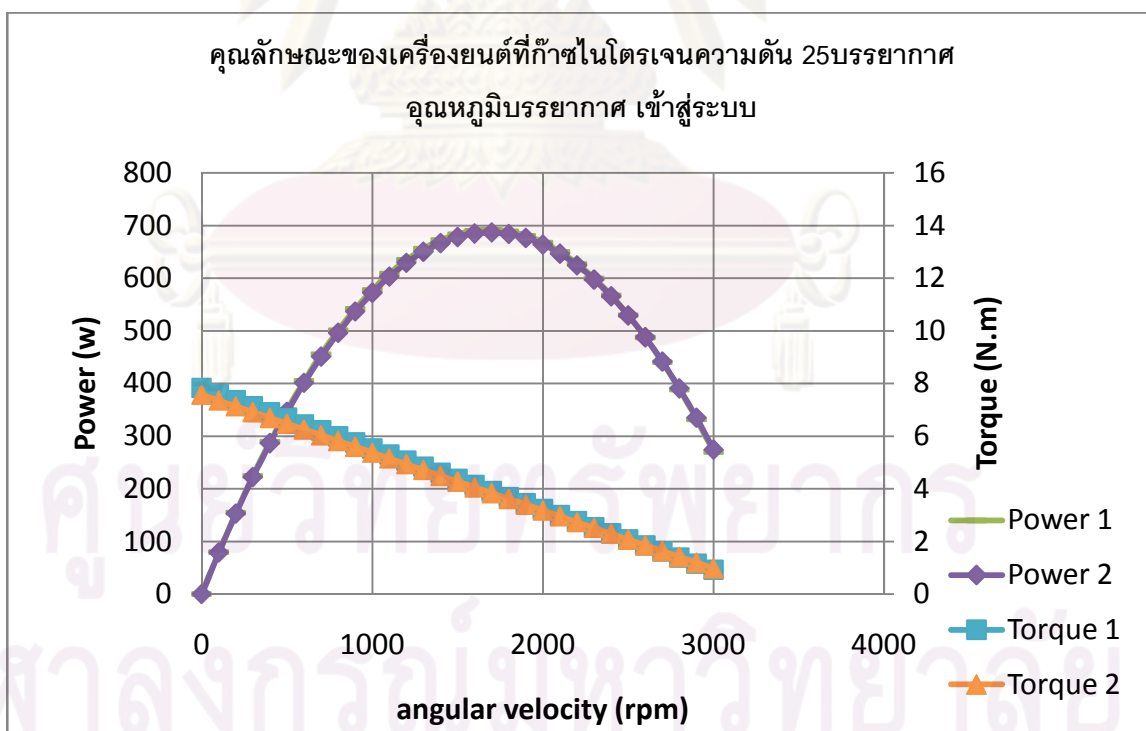
รูปที่ 6-8 สมรรถนะของอุปกรณ์ขยายตัวความดันต่ำที่ก๊าซไนโตรเจนความดัน 35 บรรยากาศ
อุณหภูมิห้อง

เมื่อจ่ายก๊าซไนโตรเจนอัดความดันที่ความดัน 30 บรรยากาศ อุณหภูมิห้อง จ่ายให้กับเครื่องยนต์ จะได้กำลังสูงสุดรวมประมาณ 752 วัตต์ โดยอุปกรณ์ขยายตัวขั้นสูงจะได้กำลังงาน 252 วัตต์ ที่ความเร็วรอบ 1925 รอบต่อนาที ,แรงบิด 1.25 นิวตันเมตร สำหรับอุปกรณ์ขยายตัวขั้นต่ำ จะได้กำลังงาน 500 วัตต์ที่ความเร็วรอบ 1475 รอบต่อนาที แรงบิด 3.24 นิวตันเมตร

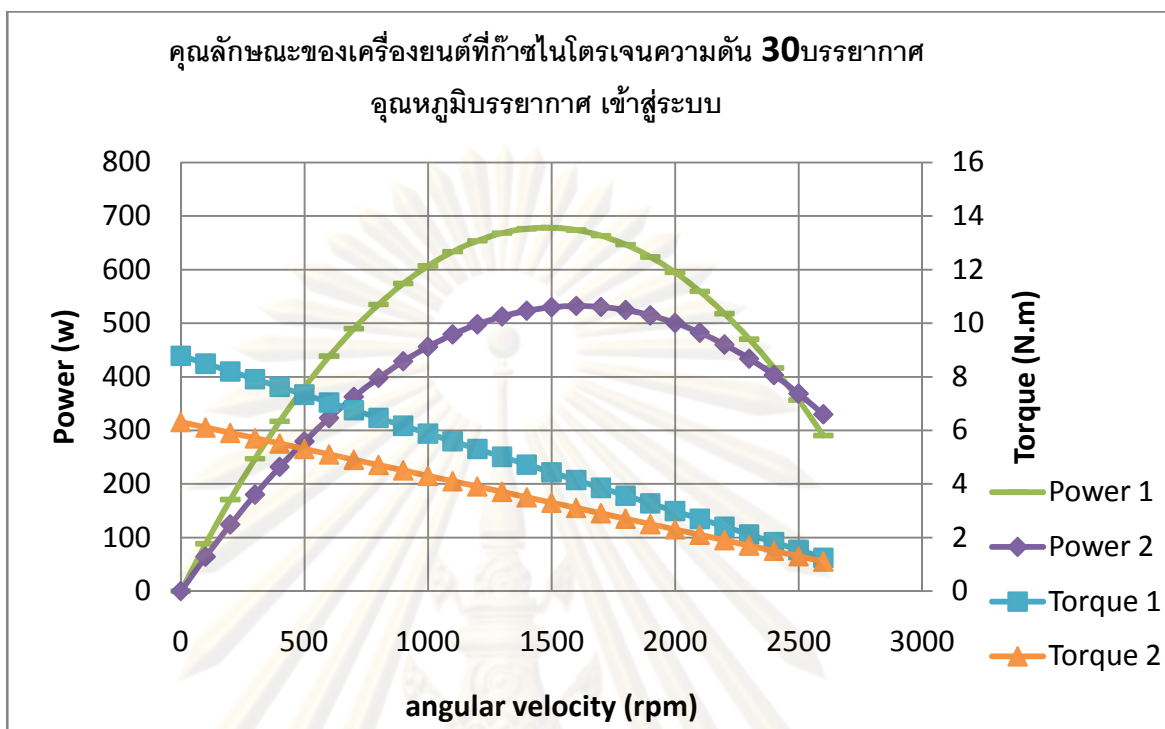
เนื่องจากเครื่องยนต์ประกอบด้วยอุปกรณ์ขยายตัวความดันสูงและต่ำซึ่งมีเพลการหมุนเป็นอิสระต่อกันดังนั้นเมื่อรวมการหมุนของเพลทั้งสองต่อกันโดยไม่พิจารณาการสูญเสียกำลังงานกลที่เกิดจากการรวมกันแล้ว โดยรวมสมการทำนายของทั้งสองอุปกรณ์ขยายตัวแบบ Super-Position จึงได้สมการทำนายกำลังงานกลและแรงบิดของเครื่องยนต์ที่ความดันไนโตรเจน 20, 25,30 และ 35 บรรยากาศ ดังนี้



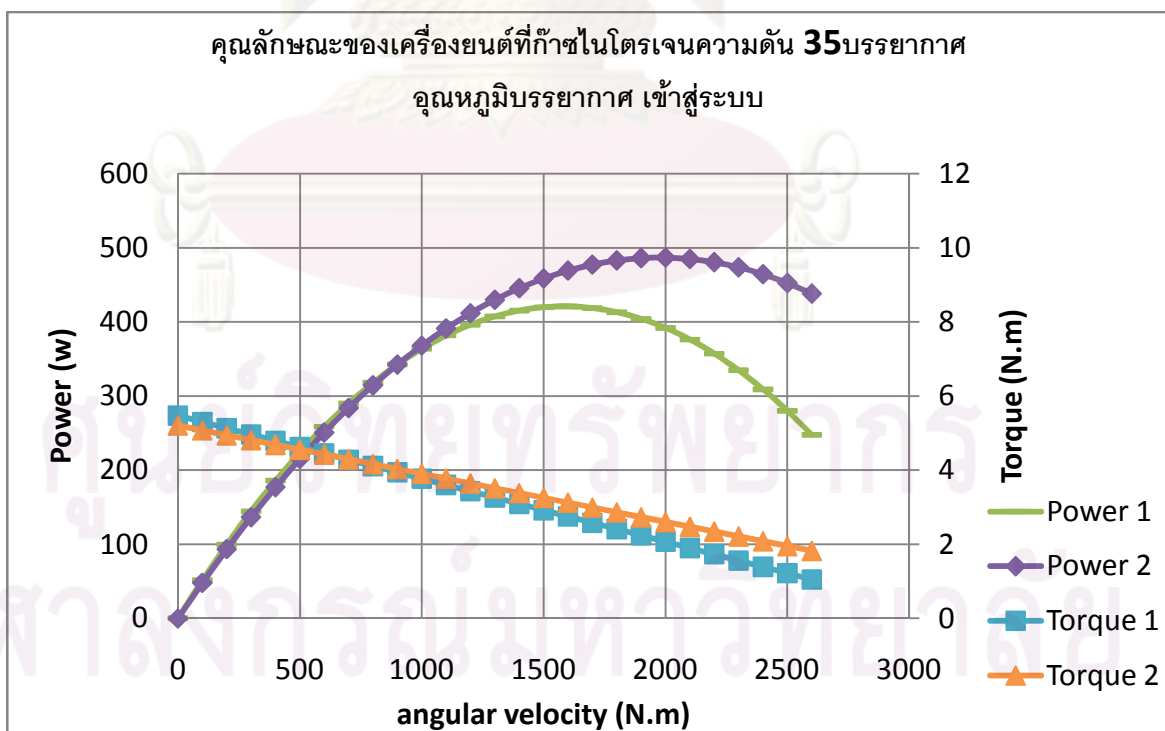
รูปที่ 6-9กราฟทำนายสมรรถนะของเครื่องยนต์ที่ก๊าซไนโตรเจนความดัน 20 บรรยากาศ
อุณหภูมิห้อง เข้าสู่ระบบ



รูปที่ 6-10กราฟทำนายสมรรถนะของเครื่องยนต์ที่ก๊าซไนโตรเจนความดัน 25 บรรยากาศ
อุณหภูมิห้อง เข้าสู่ระบบ



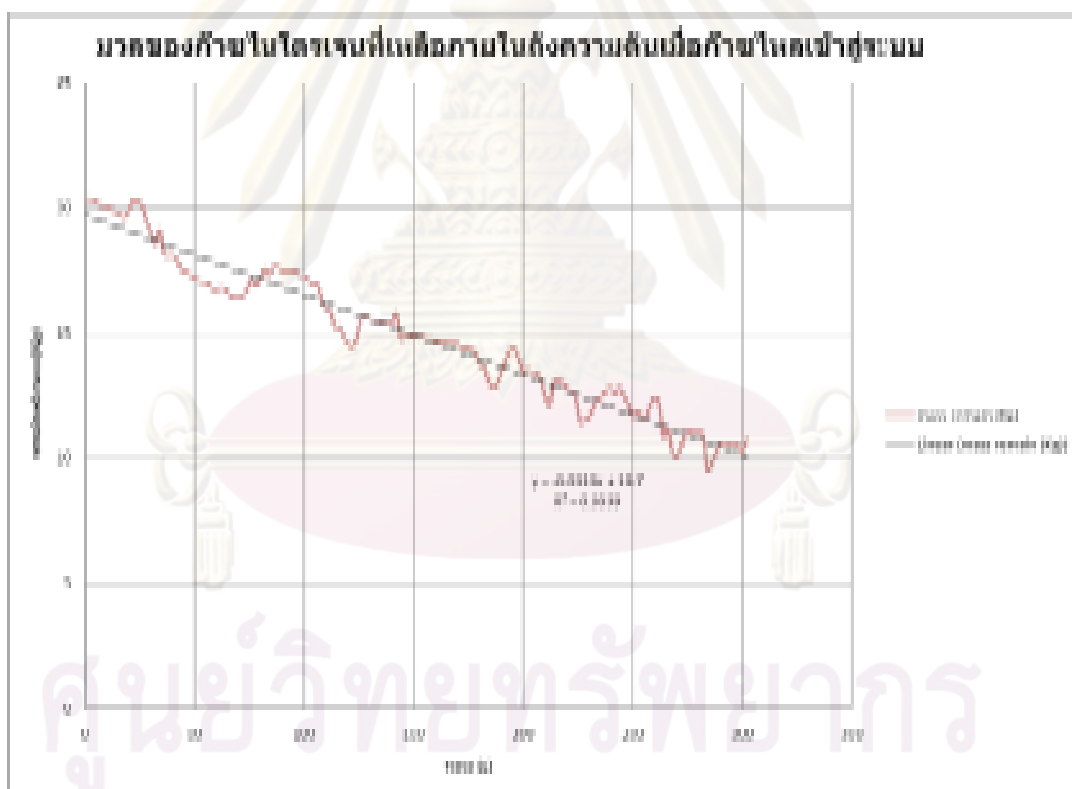
รูปที่ 6-11 กราฟทำนายสมรรถนะของเครื่องยนต์ที่ก๊าซไนโตรเจนความดัน 30 บรรยากาศ
อุณหภูมิห้อง เข้าสู่ระบบ



รูปที่ 6-12 กราฟทำนายสมรรถนะของเครื่องยนต์ที่ก๊าซไนโตรเจนความดัน 35 บรรยากาศ
อุณหภูมิห้อง เข้าสู่ระบบ

เมื่อพิจารณาจากกราฟทำนายสมรรถนะของเครื่องยนต์ที่ได้จากการรวมแบบ Super –position จะเห็นว่ากำลังงานกลสูงสุดที่ได้ลดลง เพราะความเร็วรอบของอุปกรณ์ขยายตัวความดันต่ำให้กำลังงานกลสูงสุดแล้ว ในขณะที่ความเร็วรอบดังกล่าวกำลังงานกลของอุปกรณ์ขยายตัวความดันสูงยังคงไม่ถึงจุดสูงสุด ซึ่งกำลังงานกลสูงสุดที่ได้ในแต่ละความดันของไนโตรเจนก่อนเข้าระบบจะมีค่าใกล้เคียงกันคือระหว่าง 500-700 วัตต์ และแรงบิดอยู่ระหว่าง 1-8 นิวตัน-เมตร

จากการทดลองให้ความดันก๊าซไหลเข้าที่ 25 บรรยากาศ อุณหภูมิห้อง และอัตราการไหลของมวลเท่ากับ 0.0319 Kg/s ที่ภาระเดียวเป็นเวลา 300 วินาที จะได้กำลังสูงสุดรวมประมาณ 650 วัตต์ โดยอุปกรณ์ขยายตัวขั้นสูงจะได้กำลังงาน 165 วัตต์ ที่ความเร็วรอบ 1100 รอบต่อนาที ,แรงบิด 1.43 นิวตัน-เมตร สำหรับอุปกรณ์ขยายตัวขั้นต่ำ จะได้กำลังงาน 485 วัตต์ที่ความเร็วรอบ 1400 รอบต่อนาทีแรงบิด 3.3 นิวตัน-เมตร ปรากฏว่าได้กราฟของการไหลของมวลของก๊าซ ดังนี้

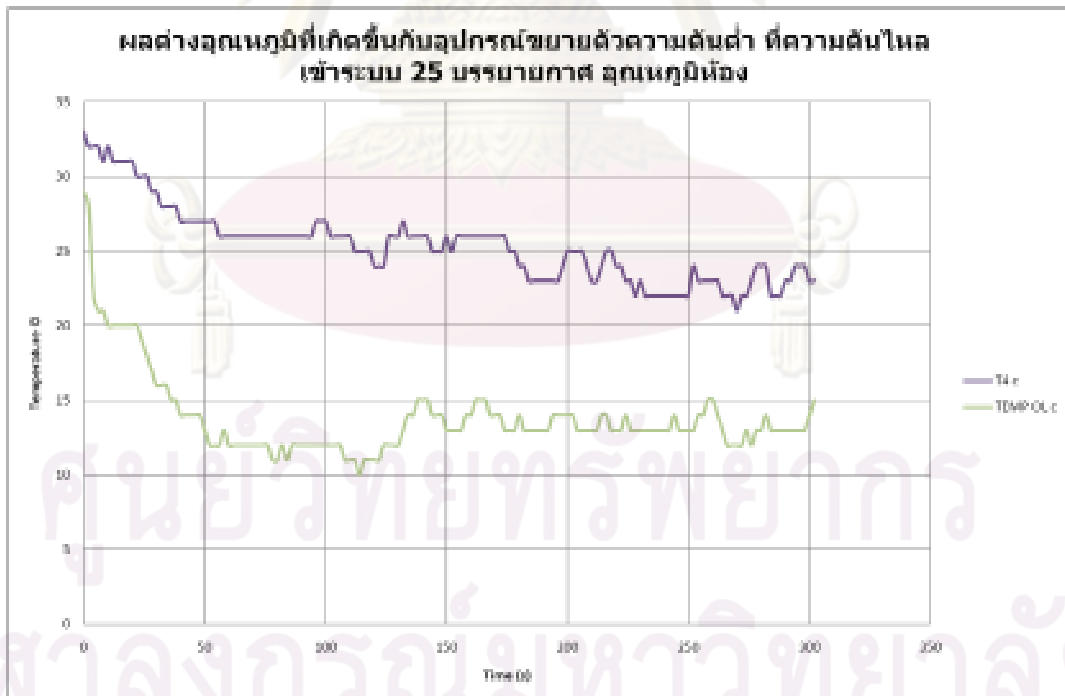


รูปที่ 6-13 อัตราการไหลของมวลไนโตรเจนเข้าสู่ระบบเครื่องยนต์

ผลต่างอุณหภูมิของก๊าซก่อนและภายหลังการเข้าสู่อุปกรณ์ขยายตัวความดันสูง



รูปที่ 6-14 อุณหภูมิก๊าซก่อนและภายหลังการเข้าสู่อุปกรณ์ขยายตัวความดันสูง



รูปที่ 6-15 อุณหภูมิก๊าซก่อนและภายหลังการเข้าสู่อุปกรณ์ขยายตัวความดันต่ำ

จากรูปที่ 6-13 อัตราการไหลของมวลของก๊าซ 0.0319 Kg/s นี้หาได้จากความดันในถังที่ลดลงต่อเวลาโดยคำนวณจากสมการก๊าซในอุดมคติ สามารถหาสมการทำนายการลดลงของมวลก๊าซได้ดังนี้

$$Y = -0.0319X + 19.7 : R^2 = 0.954$$

เมื่อ

$$Y = \text{มวลคงเหลือ (Kg)}$$

$$X = \text{เวลาที่ปล่อยก๊าซ (s)}$$

ภายใต้ภาวะของเครื่องยนต์นี้จะได้ว่าอัตราการไหลของก๊าซเข้าสู่ระบบคือ 0.0319 Kg/s และกำลังงานกลที่ได้ คือ 650 วัตต์ ซึ่งงานที่ได้จากการแปลงเป็นพลังงานกลคือ 20,376 J / Kg เมื่อเทียบกับขบวนการ Isothermal จะได้

ประสิทธิภาพเชิงกลของเครื่องยนต์ที่ภาวะนี้ = 7.7 %

จากรูปที่ 6-14 และรูปที่ 6-15 เมื่อ

T2 คือ อุณหภูมิก๊าซใน โตรเจนก่อนเข้าอุปกรณ์ขยายตัวความดันขั้นสูง (C)

T4 คือ อุณหภูมิก๊าซใน โตรเจนก่อนเข้าอุปกรณ์ขยายตัวความดันขั้นต่ำ (C)

TEMP OH คือ อุณหภูมิก๊าซใน โตรเจนขาออกจากอุปกรณ์ขยายตัวความดันขั้นสูง (C)

TEMP OL คือ อุณหภูมิก๊าซใน โตรเจนขาออกจากอุปกรณ์ขยายตัวความดันขั้นสูง (C)

ซึ่งแสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิของก๊าซใน โตรเจนจะลดลงเมื่อผ่านอุปกรณ์ขยายตัวในช่วงเวลาแรก

ประมาณ 100 -150 วินาทีแรกและจะค่อนข้างคงที่เมื่ออยู่ในช่วงเวลา 150 -300 วินาที เนื่องจาก

ความสมดุลของการถ่ายเทความร้อนจากบรรยากาศเข้าสู่ระบบ จากการคำนวณความร้อนที่

บรรยากาศถ่ายเทสู่ก๊าซใน โตรเจนตั้งแต่เวลา 150-300 วินาทีสำหรับอุปกรณ์ขยายตัวความดันสูง

ประมาณ 12.14 KJ และอุปกรณ์ขยายตัวความดันต่ำประมาณ 52.68 KJ ซึ่งเป็นเหตุผลหนึ่งที่ทำให้

กำลังงานกลของอุปกรณ์ขยายตัวความดันต่ำมีค่ามากกว่าอุปกรณ์ขยายตัวความดันสูง อย่างไรก็ตาม

อุณหภูมิที่วัดได้จากอุปกรณ์การวัดก็มากกว่าอุณหภูมิที่ได้จากการคำนวณมาก สาเหตุโดย

สมมุติฐานน่าจะเกิดจากการถ่ายเทความร้อนของอากาศในบรรยากาศถูกถ่ายเทเข้าไปภายในจุด

เชื่อมต่อของเทอร์โมคัพเปิลในปริมาณที่มากกว่าก๊าซใน โตรเจนจะรักษาอุณหภูมิภายหลังการ

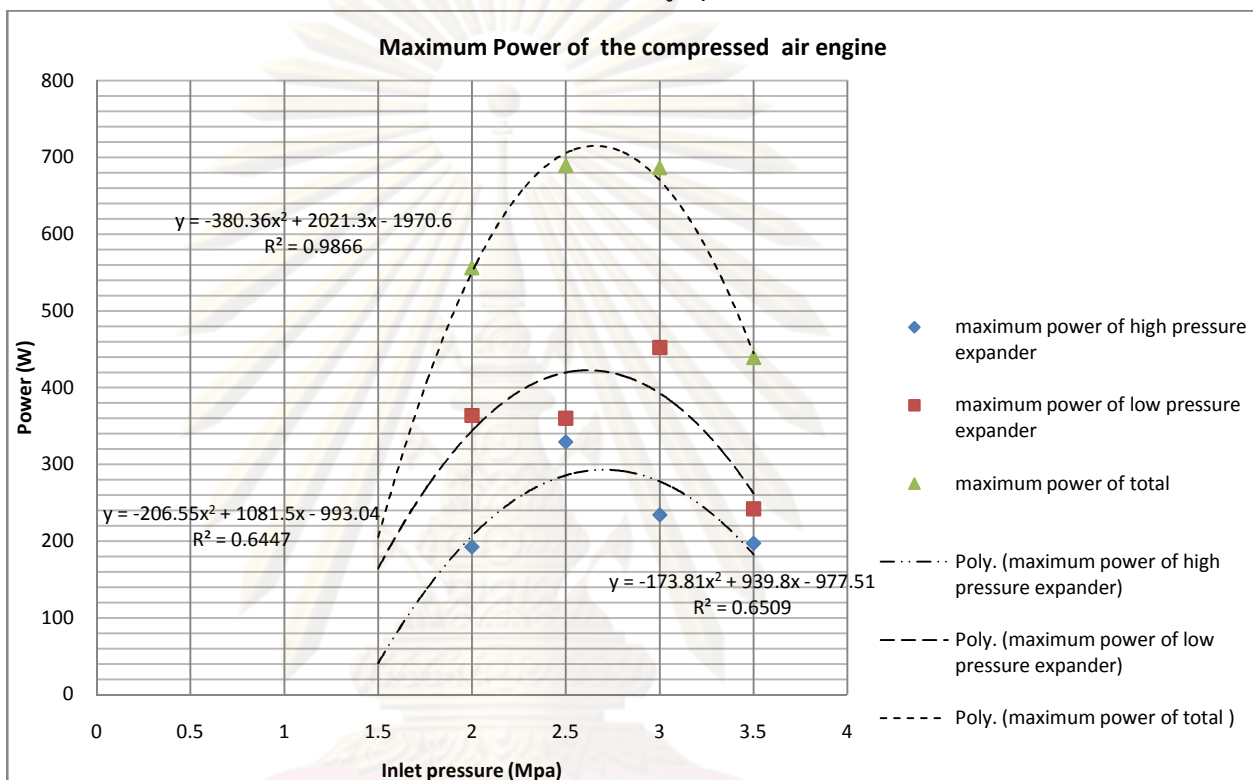
ขยายตัวได้ ประกอบกับจุดติดตั้งเทอร์โมคอปเปอร์ที่ไม่สามารถติดที่จุดใกล้กับก๊าซที่ไหลภายในได้

เนื่องจากปัญหาเรื่องความแข็งแรงของจุดเชื่อมต่อที่ต้องทนแรงดันของก๊าซด้วย ซึ่งต้องอาศัยการพา

และการนำความร้อนสู่จุดวัดอีกต่อหนึ่ง

6.2 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังงานสูงสุดที่ได้กับความดันที่จ่ายให้แก่เครื่องยนต์

จากการทดลองที่ให้ความดันแก่ระบบเครื่องยนต์ที่ความดัน 20,25,30 และ 35 บรรยากาศ โดยกำลังงานสูงสุดที่ได้ออกมาจากอุปกรณ์ขยายตัวความดันสูงและต่ำนั้นความเร็วรอบจะไม่เท่ากันดังแสดงในหัวข้อ 6.1 นั้น จะสามารถรวมกันเป็นกำลังงานกลสูงสุดรวมในแต่ละความดันจ่ายเข้าดังนี้



รูปที่ 6-16 ความสัมพันธ์ระหว่างความดันจ่ายระบบกับกำลังงานกลสูงสุดที่ได้

จากกราฟกำลังงานกลสูงสุดของอุปกรณ์ขยายตัวความดันสูงและต่ำนั้นจะเพิ่มขึ้นเมื่อความดันจ่ายเข้าระบบเพิ่มขึ้นจนกระทั่งมีความดัน 30 บรรยากาศกำลังงานกลสูงสุดจะลดลงเรื่อยๆ สาเหตุหลักของการลดลงของกำลังงานกลสูงสุดนี้น่าจะเกิดจากการรั่วไหลภายในที่สูงขึ้นและแรงเสียดทานภายในที่สูงขึ้นเมื่อเพิ่มความดันจ่ายเข้าระบบให้มากกว่า 30 บรรยากาศ

6.3 การรั่วไหลภายในและแรงเสียดทานภายในของอุปกรณ์ขยายตัว

การรั่วไหลของก๊าซไนโตรเจนภายในอุปกรณ์ขยายตัวความดันสูงและต่ำที่ไม่ทำให้เกิดกำลังงานกลไม่สามารถตรวจสอบได้แน่ชัดนัก อย่างไรก็ตามสามารถเปรียบเทียบได้ว่าอุปกรณ์ขยายตัวทั้งสองชิ้นนั้น ชิ้นไหนมีการรั่วไหลมากกว่ากันโดยการจ่ายลมความดัน 3, 4, 5 และ 6 บรรยากาศที่อุณหภูมิห้องจากถังจ่ายขนาดเดียวกัน 168 ลิตร เข้าสู่ระบบและจับเวลาโดยความดันในถังลดลงจาก 10 บรรยากาศจนกระทั่งถึง 5 บรรยากาศสำหรับความดันจ่ายที่ 3, 4 และ 5 บรรยากาศ ส่วนที่ความ

ดันเข้า 6 บรรยากาศจะจับเวลาตั้งแต่ความดันในถังจาก 10 บรรยากาศถึง 6 บรรยากาศ ในขณะที่สร้างภาระให้กับอุปกรณ์แต่ละชิ้นจนไม่เกิดการหมุนที่อุปกรณ์ขยายตัวนั้นเพื่อทำให้เสมือนว่าเกิดการรั่วไหลอย่างสมบูรณ์ที่อุปกรณ์นั้น

ตาราง 6.1 การเปรียบเทียบการรั่วไหลภายในอุปกรณ์ขยายตัวทั้งสองชิ้น

Regulated pressure (Bar)	Time (s)	
	High pressure state	Low pressure state
3	185.10*	182.88*
	186.22*	181.25*
	185.15*	181.75*
4	146.59*	141.01*
	145.09*	141.59*
	145.95*	142.12*
5	115.24*	115.90*
	118.17*	116.44*
	117.54*	115.31*
	Time (s)	
6	78.98**	77.55**
	80.20**	76.38**
	79.12**	77.12**

* ความดันในถังความดันลดลงจาก 10 ถึง 5 บรรยากาศ

**ความดันในถังความดันลดลงจาก 10 ถึง 6 บรรยากาศ

จากตาราง 6.1 เมื่อจ่ายลมปริมาตรเท่ากันที่ความดันเดียวกันสู่ระบบโดยสร้างภาระให้อุปกรณ์แต่ละชิ้น จนกระทั่งเกิดการรั่วไหลภายในอย่างสมบูรณ์จะเห็นได้ว่าเวลาที่อากาศไหลผ่านภายในอุปกรณ์ขยายตัวความดันสูงจะใช้เวลาในการไหลมากกว่าอุปกรณ์ขยายตัวความดันต่ำในทุกๆความดันที่ไหลเข้าระบบ ซึ่งสามารถสรุปได้ว่าการรั่วไหลที่เกิดขึ้นภายในอุปกรณ์ขยายตัวความดันต่ำมีค่ามากกว่าอุปกรณ์ขยายตัวความดันสูงเล็กน้อย

แรงเสียดทานภายในอุปกรณ์ขยายตัวที่เกิดขึ้นเมื่อแกนหมุนเคลื่อนที่สามารถตรวจสอบได้โดยการใช้มอเตอร์ไฟฟ้าขนาด 1/2 แรงม้าเชื่อมต่อแกนเพลลาอุปกรณ์ขยายตัวความดันสูงและต่ำตามลำดับและพิจารณากำลังงานไฟฟ้าที่มอเตอร์ไฟฟ้าใช้ดังนี้

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตาราง 6.2 การเปรียบเทียบกำลังงานไฟฟ้าที่เกิดจากแรงเสียดทานภายในอุปกรณ์ขยายตัวทั้งสองชิ้น

มอเตอร์ไฟฟ้าขนาด 1/2 แรงม้า	ประเภท	
	อุปกรณ์ขยายตัวความดันสูง	อุปกรณ์ขยายตัวความดันต่ำ
ความเร็วรอบ (rpm)	1480	1485
กำลังงานไฟฟ้า (watts)	211	291
แรงดันไฟฟ้า (volt)	216	215
กระแสไฟฟ้า (amp)	3.59	3.56
power factor	0.27	0.38

จากตาราง 6.2 เมื่อหมุนเพลลาของอุปกรณ์ขยายตัวความดันสูงและต่ำที่ความเร็วรอบใกล้เคียงกันที่ 1480 รอบต่อนาทีกำลังงานไฟฟ้าที่มอเตอร์ใช้สำหรับอุปกรณ์ขยายตัวความดันสูงเท่ากับ 211 วัตต์ และอุปกรณ์ขยายตัวความดันต่ำที่ 291 วัตต์ซึ่งแสดงให้เห็นว่าที่ความเร็วรอบนี้แรงเสียดทานภายในของอุปกรณ์ขยายตัวความดันสูงมีค่าต่ำกว่าคิดเป็นกำลังงานไฟฟ้าเท่ากับ 80 วัตต์ เนื่องจากแรงเสียดทานภายในของอุปกรณ์ที่เกิดการหมุนส่วนใหญ่จะแปรผันตามความเร็วรอบในสัดส่วนที่สามารถทำนายได้โดยสมการ ดังนั้นจึงประมาณได้ว่าในช่วงความเร็วรอบที่เครื่องยนต์หมุนนี้แรงเสียดทานภายในของอุปกรณ์ขยายตัวความดันสูงจะมีค่าต่ำกว่าอุปกรณ์ขยายตัวความดันต่ำตลอดช่วงการหมุน

บทที่ 7

สรุปการวิจัยและข้อเสนอแนะ

7.1 สรุปผลการวิจัย

การทดลองได้ทำการเปลี่ยนความดันที่ไหลให้แก่ระบบ ทั้งหมด 4 ค่าโดยเริ่มจากความดัน 20,25,30 และ 35 บรรยากาศ โดยกำลังงานที่ได้จากระบบทดสอบ ที่ความดันไหล เข้า 20 บรรยากาศจะได้กำลังงานมากที่สุด 560 วัตต์ (จากอุปกรณ์ขยายตัวความดันสูง 214 วัตต์ที่ ความเร็วรอบ 1850 รอบ/นาที และอุปกรณ์ขยายตัวขั้นต่ำ 346 วัตต์ที่ 2250 รอบ/นาที) เข้า 25 บรรยากาศจะได้กำลังงานมากที่สุด 700 วัตต์(จากอุปกรณ์ขยายตัวความดันสูง 347 วัตต์ที่ ความเร็วรอบ 2200 รอบ/นาที และอุปกรณ์ขยายตัวขั้นต่ำ 360 วัตต์ที่ 2225 รอบ/นาที) เข้า 30 บรรยากาศจะได้กำลังงานมากที่สุด 752 วัตต์(จากอุปกรณ์ขยายตัวความดันสูง 252 วัตต์ที่ ความเร็วรอบ 1925 รอบ/นาที และอุปกรณ์ขยายตัวขั้นต่ำ 500 วัตต์ที่ 1475 รอบ/นาที) เข้า 35 บรรยากาศจะได้กำลังงานมากที่สุด 446 วัตต์(จากอุปกรณ์ขยายตัวความดันสูง 186 วัตต์ที่ ความเร็วรอบ 2850 รอบ/นาที และอุปกรณ์ขยายตัวขั้นต่ำ 260 วัตต์ที่ 1875 รอบ/นาที)

จากข้อมูลความดันไหลเข้า 30 บรรยากาศจะได้กำลังงานมากที่สุด และลดลงเมื่อความดันที่ไหลเข้า มีค่ามากขึ้น สาเหตุโดยสมมุติฐานน่าจะเกิดจากการรั่วของของไหลที่มากขึ้นเมื่อความดันมากขึ้น รวมถึงความเสียหายภายในที่สูงขึ้นเมื่อความเร็วรอบเพิ่มขึ้น

กำหนดความดันก๊าซไนโตรเจนที่ 25 บรรยากาศอุณหภูมิห้อง ภายใต้ภาระของเครื่องยนต์คงที่ ค่าหนึ่ง โดยอุปกรณ์ขยายตัวขั้นสูงจะได้กำลังงาน 165 วัตต์ ที่ความเร็วรอบ 1100 รอบต่อนาที , แรงบิด 1.43 นิวตันเมตร สำหรับอุปกรณ์ขยายตัวขั้นต่ำ จะได้กำลังงาน 485 วัตต์ที่ความเร็วรอบ 1400 รอบต่อนาทีแรงบิด 3.3 นิวตันเมตร จะได้ว่าอัตราการไหลของก๊าซเข้าสู่ระบบคือ 0.0319 Kg/s และ กำลังงานกลที่ได้ คือ 650 วัตต์ ซึ่งงานที่ได้จากการแปลงเป็นพลังงานกลคือ 20,376 J / Kg เมื่อเทียบกับขบวนการ Isothermal จะได้ ประสิทธิภาพเชิงกลของเครื่องยนต์ที่ภาระนี้ = 7.7 %

7.2 ข้อเสนอแนะ

การศึกษาเครื่องยนต์ที่ใช้อากาศความดันเป็นต้นกำลังโดยการทดลองสร้างเครื่องยนต์ต้นแบบ และเก็บผลการทดลองแสดงให้เห็นความเป็นไปได้ที่จะใช้งานเครื่องยนต์แนวคิดนี้เมื่อมีการพัฒนา ชิ้นส่วนอุปกรณ์ที่ใช้ในการขยายตัวของก๊าซ โดยการลดช่วงที่ก๊าซมีการไหลภายในระบบโดยไม่

เกิดกำลังงานทางกล และออกแบบชิ้นส่วนรวมถึงวิธีการถ่ายเทความร้อนเข้าสู่ระบบ โดยเกิดการไหลภายในให้น้อยที่สุด

อย่างไรก็ตามการเลือกอุปกรณ์ขยายตัวที่ดัดแปลงมาจากอุปกรณ์ปืนลม (Air Wrench) ที่ใช้อุปกรณ์ขยายตัวแบบใบพัดเลื่อนจะไม่สามารถควบคุมการหน่วงเวลาที่ใช้ในการเพิ่มอุณหภูมิให้ของไหลก่อนการขยายตัวได้เพราะมีความสัมพันธ์โดยตรงกับความเร็วรอบของเพลา ซึ่งเป็นปัญหาที่จะทำให้การถ่ายเทความร้อนจากบรรยากาศเข้าสู่ก๊าซภายในได้ทันที ซึ่งจะส่งผลต่อประสิทธิภาพการขยายตัวของก๊าซโดยตรง โดยเสนอว่าการออกแบบอุปกรณ์ขยายตัว ควรออกแบบให้อุปกรณ์ขยายตัวของก๊าซเป็นแบบลูกสูบที่มีช่วงชักแบบสามารถหน่วงเวลาก่อนการขยายตัวของก๊าซดังเช่นเครื่องยนต์ของ MDI เพื่อการถ่ายเทความร้อนสู่ก๊าซจะได้สูงขึ้นโดยออกแบบให้มีการขยายตัวของก๊าซสามชั้นและเมื่อมวลของก๊าซที่ไหลเข้าสู่อุปกรณ์ขยายตัวชั้นที่สามเริ่มจะไม่คงที่ ต้องออกแบบการ Throttling เพื่อควบคุมอัตราการไหลเข้าสู่การขยายตัวชั้นที่สองและสามตามลำดับ อย่างไรก็ตามจากวิธีการดังที่เสนอนี้ก็จะมีปัญหาเกี่ยวกับการควบคุมกำลังงานที่ได้จากเครื่องยนต์อย่างเห็นได้ชัด ซึ่งก็จะเป็นปัญหาที่จะต้องแก้ไขกันในลำดับต่อไป หรือการออกแบบให้เป็นเครื่องยนต์ลูกผสมระหว่างเครื่องยนต์สันดาปภายนอกเช่นเครื่องยนต์วัฏจักรสเตอร์ริงค์เพื่อให้เครื่องยนต์นี้สามารถทำงานได้เมื่ออากาศอัดความดันหมดและเพื่อการเพิ่มประสิทธิภาพการขยายตัวจากความร้อนสูญเสียที่เกิดจากการสันดาป โดยเครื่องยนต์ที่จะใช้งานได้จริงแบบมีประสิทธิภาพจำเป็นต้องมีการศึกษาและทำความเข้าใจกันอีกมาก

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รายการอ้างอิง

- [1] พงษ์ธร จรรย์ญากรณ์ ,เทอร์โมไดนามิกส์,พิมพ์ครั้งแรก กรุงเทพมหานคร: ซีเอ็ดยูเคชั่น ,2540
- [2] ศ.ดร.วิฑูรย์ อิงภากรณ์,รศ.ชาญ ถนัดงาน ,การออกแบบเครื่องจักรกล, กรุงเทพมหานคร: ซีเอ็ดยูเคชั่น,2544
- [3] Ulf Bossel ,Thermodynamic Analysis of Compressed Air Vehicle Propulsion, Euro fuel cell Forum, Morgenacherstrasse 2F CH-5452 Oberrohrdorf/Switzerland
- [4] Patrick Mazza and Roel Hammerschlag ,Wind-to-Wheel Energy assessment, Institute for Lifecycle Environment Assessment ,Seattle ,WA 98122-0437/USA
- [5] K. David Huang , Wei Chuan Chang ,Sheng – Chung Tzeng ,Energy-saving hybrid vehicle using a pneumatic-power system, 2004 Elsevier Ltd., Available online 21 December 2004
- [6] C.Knowlen ,A.T. Mattick,A.P. Bruckner and A. Hertzberg, High Efficiency Energy Conversion Systems for Liquid Nitrogen Automobiles, Ultra-Low Emission Liquid Nitrogen Automobile, Quasi-Isothermal Expansion Engines for Liquid Nitrogen Automotive Propulsion ,1998 Society of Automotive Engineers,Inc.
- [7] Anthony Bedford, Wallace Fowler , Engineering Mechanics Static, second edition USA.,Addison-Wesley longman, Inc .1998
- [8] Richard E. Sontage, Claus Borgnakke , Gordon J.Van Wylen, Fundamentals of Thermodynamics, Fifth edition USA.,John Wiley & Sons, Inc .1998
- [9] Roger A.Hinrichs, Merlin Kleinbach , Energy Its Use and the Environment,third edition USA.,Harcourt, Inc .2002
- [10] Patrick H. Oosthuizen,William E. Carscallen, Compressible Fluid Flow ,International Edition 1997 ,McGraw-Hill Companies,Inc
- [11] <http://www.theaircar.com>.
- [12] <http://www.aircaraccess.com>
- [13] <http://en.wikipedia.org> (search “choke flow”)
- [14] <http://www.energine.com>
- [15] <http://www.engineair.com>

[16] <http://users.tinyworld.co.uk/ainskip/thieves/Bridge/PartII.htm>

[17] <http://www.hydraulicspneumatics.com>

[18] <http://www.maclab.seas.ucla.edu/projects.html>

[19] http://www.efunda.com/materials/alloys/carbon_steels/show_carbon.cfm?ID=AISI_1045&prop=all&Page_Title=AISI%201045



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก

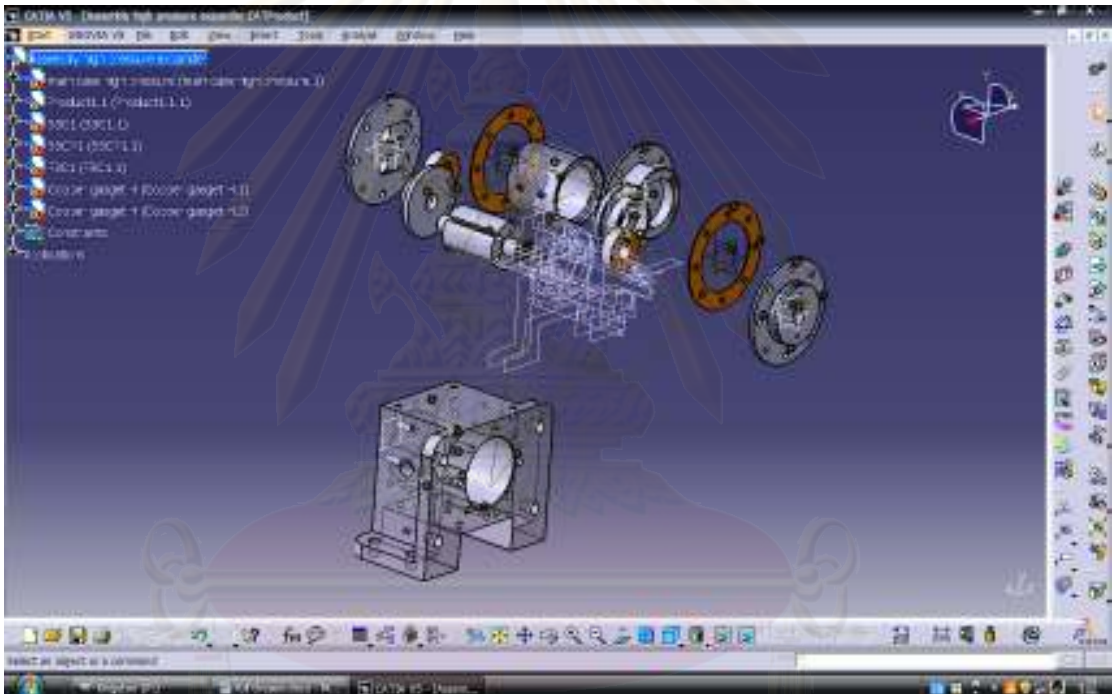
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ก.

โปรแกรมที่ใช้ในการออกแบบอุปกรณ์และแบบชิ้นส่วน

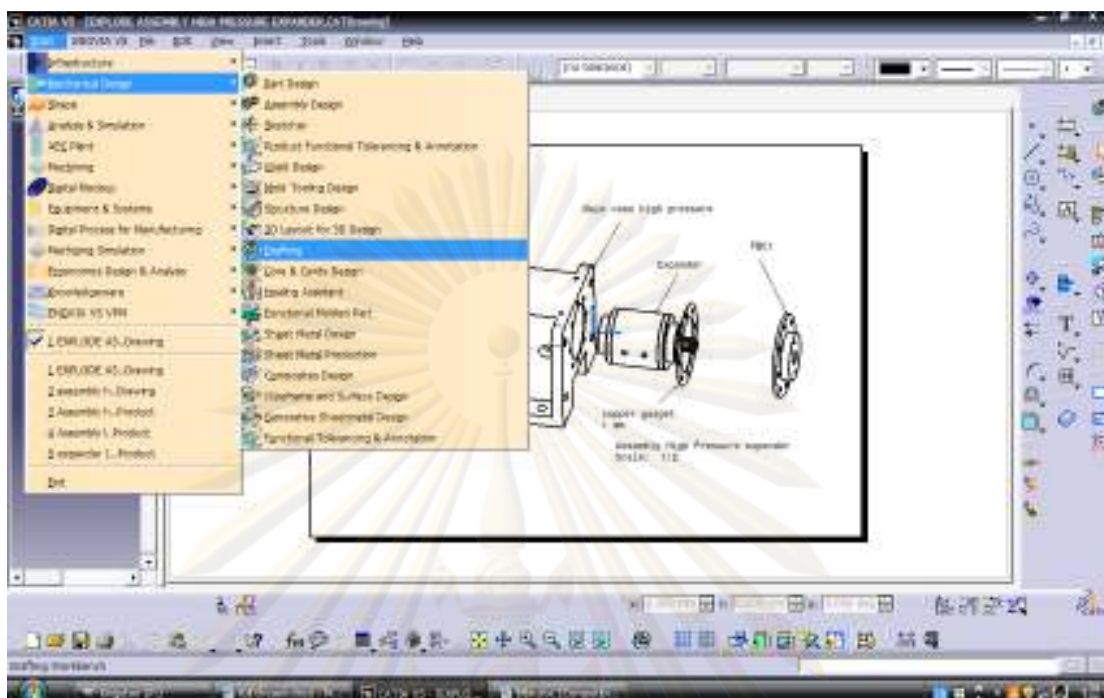
ก.1 โปรแกรมที่ใช้ในการออกแบบ

โปรแกรมที่ใช้ในการเขียนแบบ คือ โปรแกรม CATIA V5 R16 student edition โดยการเขียนแบบที่จำเป็นจะต้องขึ้นรูปใหม่ และชิ้นส่วนที่มีอยู่แล้วโดยการประกอบชิ้นส่วนจะต้องเกิดขึ้นภายในโปรแกรมก่อนและพิจารณาความเหมาะสมของการเขียนแบบออกมาดังภาพ



รูปที่ ก.1 ลักษณะของโปรแกรม CATIA V5 R16 ที่ใช้ในการออกแบบชิ้นส่วน

ภายหลังการออกแบบมีความเหมาะสมเชิงขนาดของชิ้นส่วนและการประกอบแล้วจึงใช้โปรแกรมในส่วนที่เกี่ยวกับการ Drawing (Mechanical design)/Drafting ในการเขียนแบบและให้ขนาดในการติดต่อ โรงกลึงในการขึ้นรูปต่อไป ดังรูป



รูปที่ ก.2 ลักษณะของการเขียนแบบด้วยโปรแกรม CATIA V5 R16

ก.2 แบบชิ้นส่วน

แบบชิ้นส่วนที่ใช้ในการวิจัยประกอบไปด้วย 3 ส่วนหลัก คือ

ก.2.1 แบบชิ้นส่วนของอุปกรณ์ขยายตัวความดันสูง

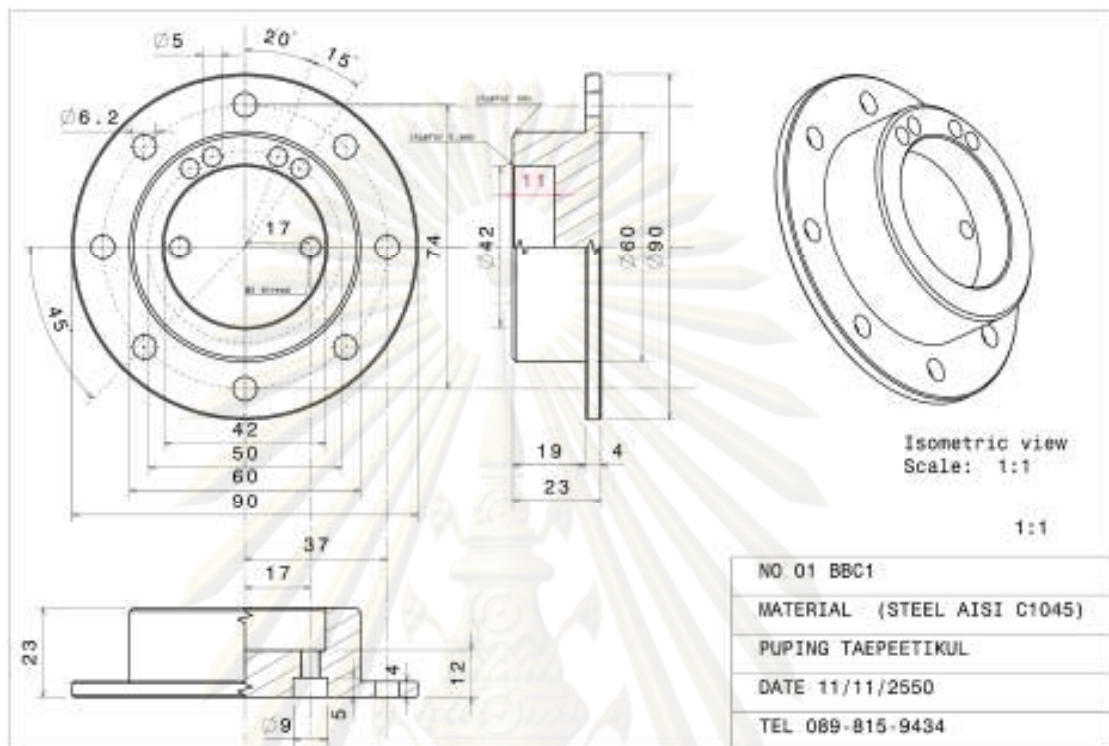
ก.2.2 แบบชิ้นส่วนของอุปกรณ์ขยายตัวความดันต่ำ

ก.2.3 แบบชิ้นส่วนที่เกี่ยวกับการประกอบระบบการไหล, โครงสร้างและอุปกรณ์สร้างภาวะ

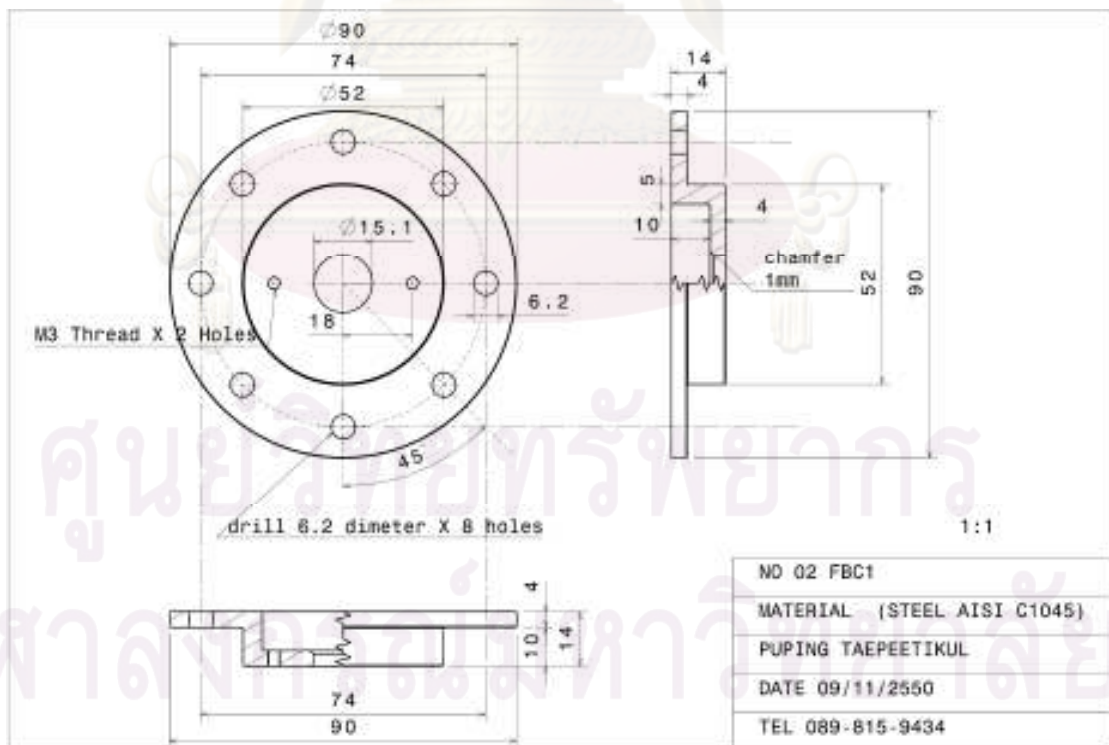
เนื่องจากแบบชิ้นส่วนที่จำเป็นในการประกอบระบบให้ทำงานได้จะไม่ได้เขียนแบบทุกชิ้นเพราะมีรายละเอียดมาก ดังนั้นที่เขียนเป็นแบบชิ้นมาส่วนใหญ่ จำเป็นจะต้องมีการประกอบภายในโปรแกรมก่อน ส่วนชิ้นส่วนที่มีความสำคัญเชิงขนาดรองลงมาจะละการเขียนแบบไว้แต่จะประกอบภายหลังเมื่อชิ้นส่วนที่ได้ขึ้นรูปมาแล้ว

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

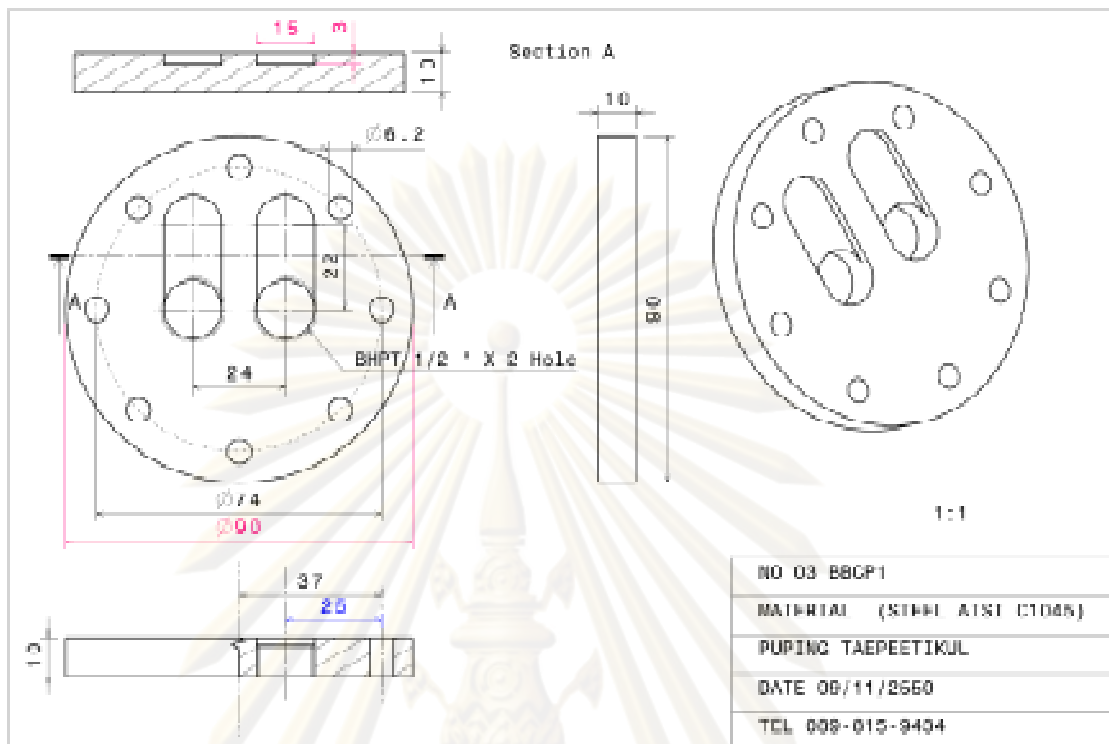
ก.2.1 แบบขึ้นส่วนของอุปกรณ์ขยายตัวความดันสูง



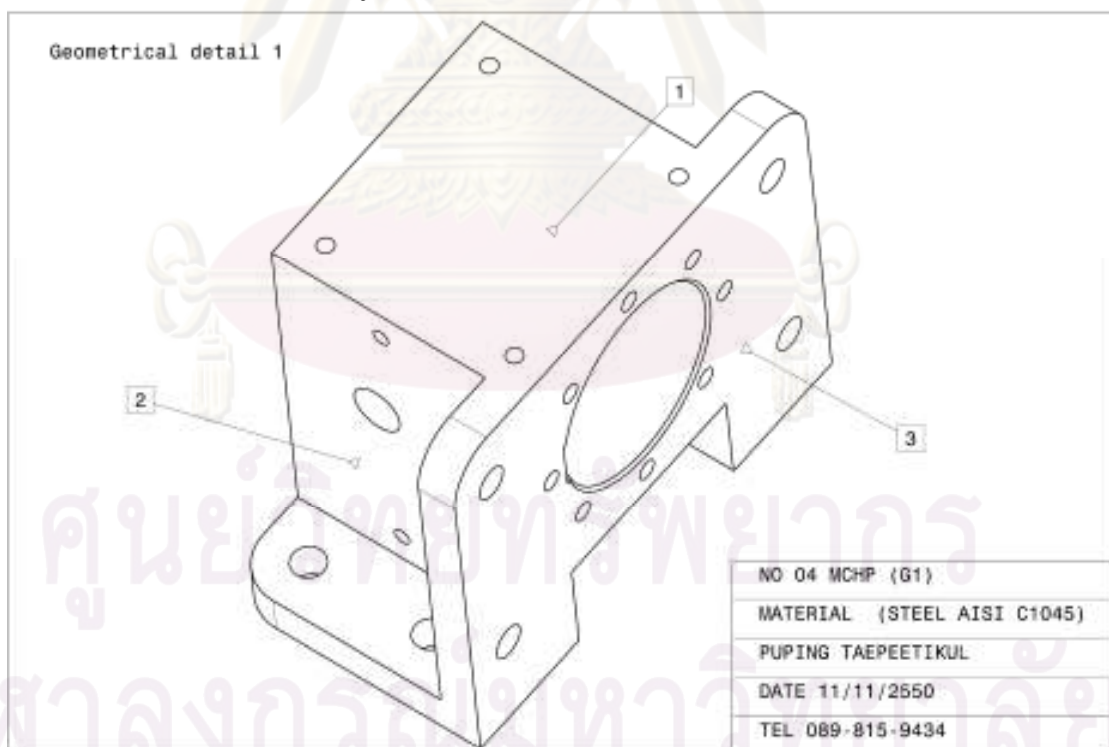
รูปที่ ก.3 แบบ Drawing ของ BBC1



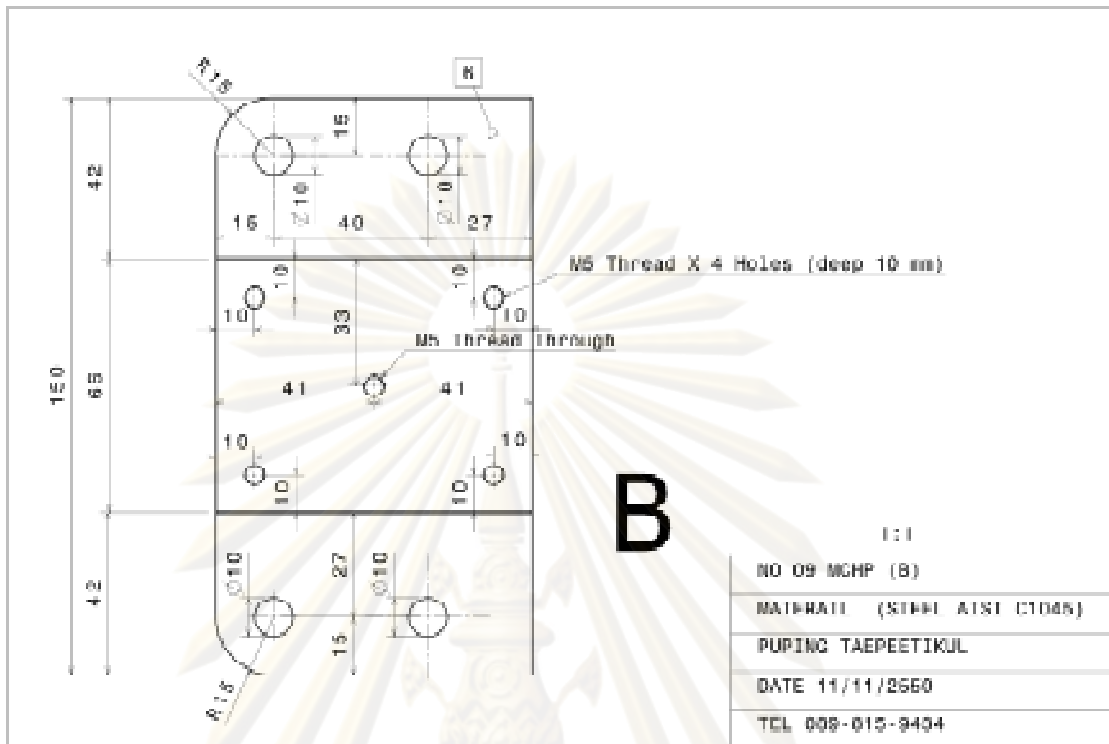
รูปที่ ก.4 แบบ Drawing ของ FBC1



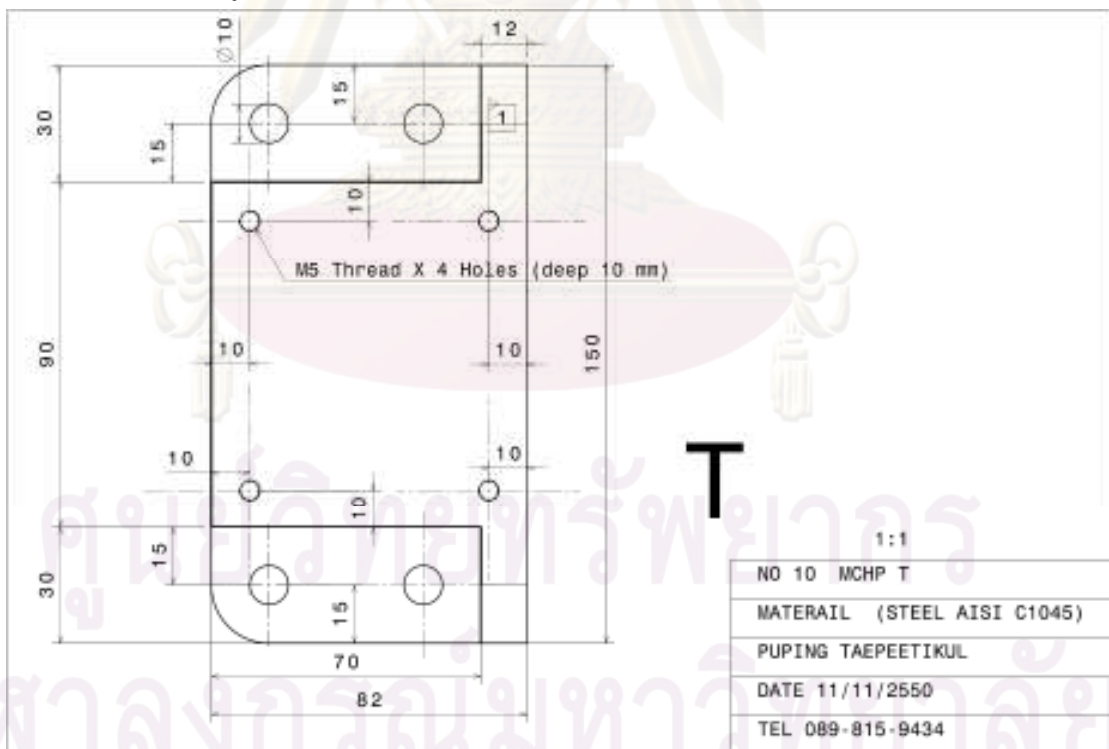
รูปที่ ก.5 แบบ Drawing ของ BSCP1



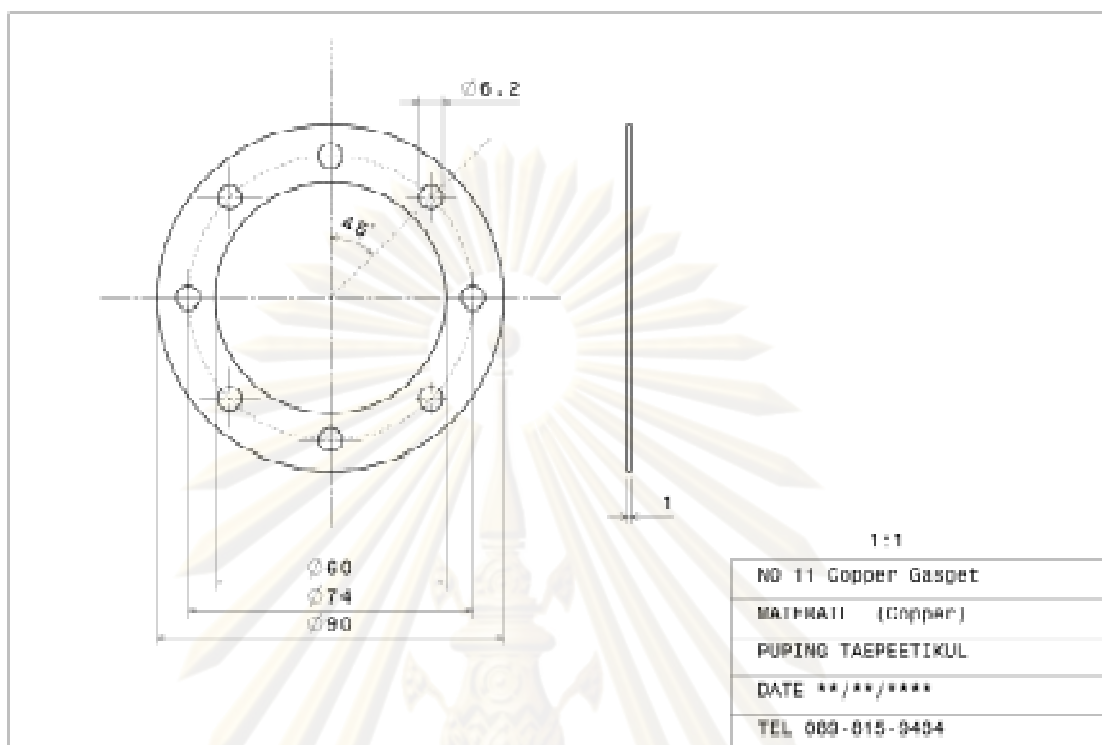
รูปที่ ก.6 แบบ Drawing (Geometrical detail) ของ MCHP



รูปที่ ก.9แบบ Drawing ของ MCHP ด้าน Bottom side view



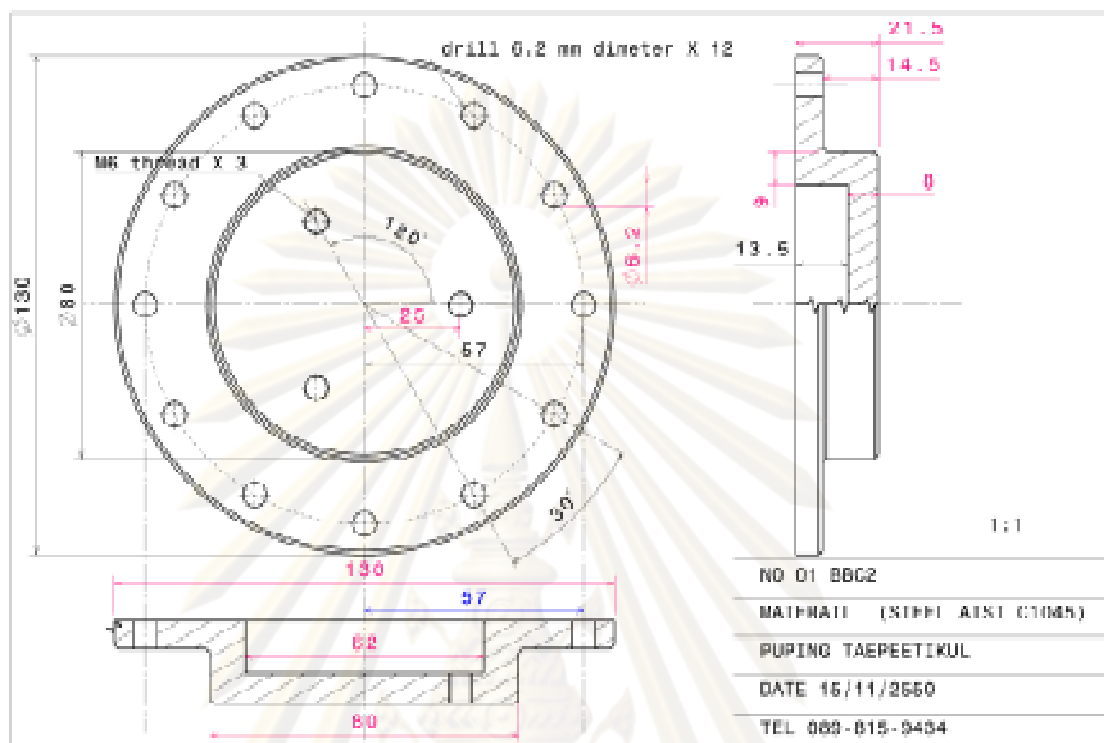
รูปที่ ก.10แบบ Drawing ของ MCHP ด้าน Top side view



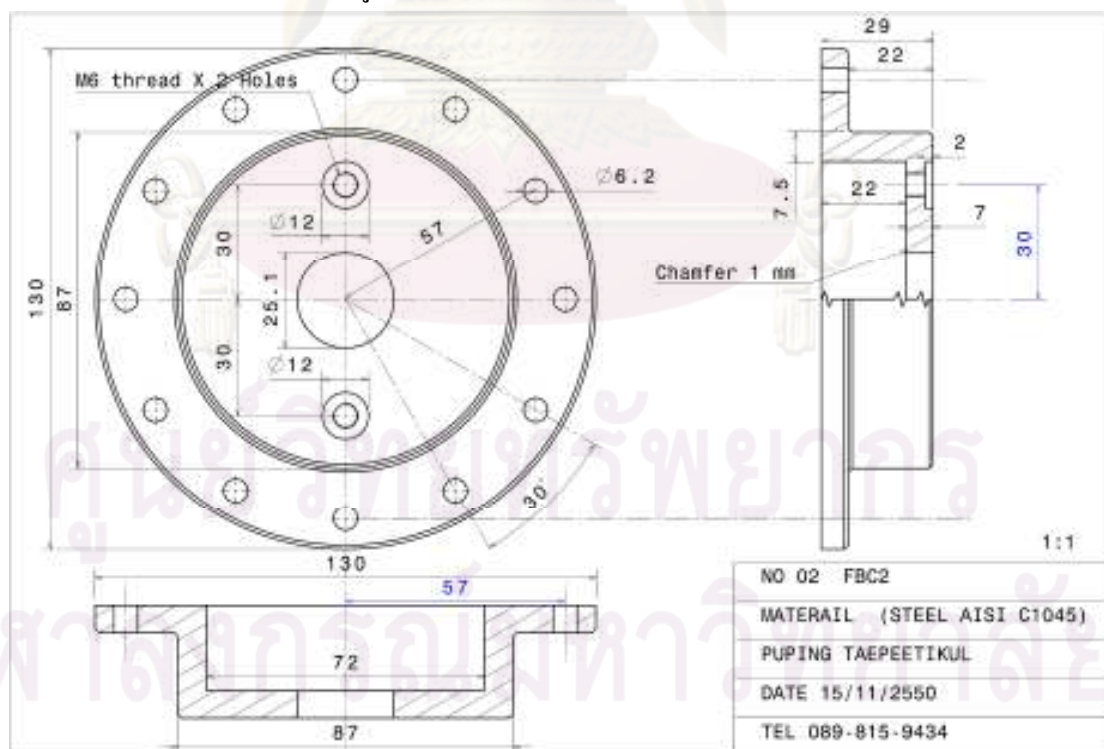
รูปที่ ก.11แบบ Drawing ของ ประเก็นทองแดง

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

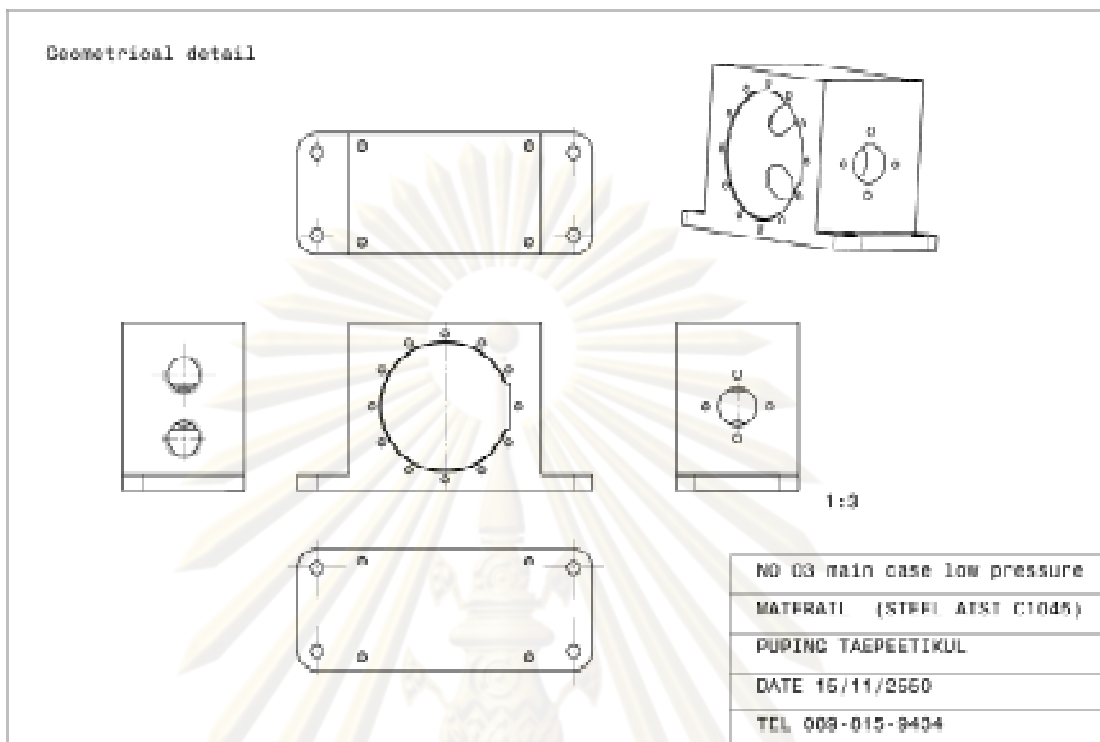
ก.2.2 แบบชิ้นส่วนของอุปกรณ์ขยายตัวความดันต่ำ



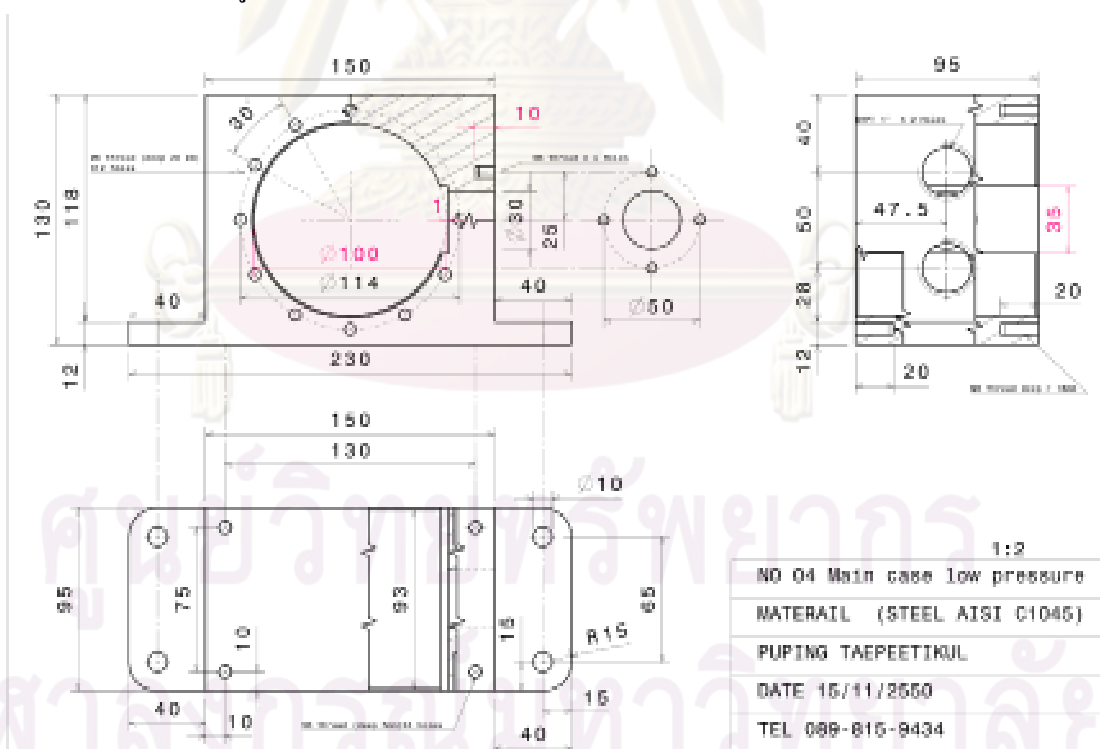
รูปที่ ก.12แบบ Drawing ของ BBC2



รูปที่ ก.13แบบ Drawing ของ FBC2

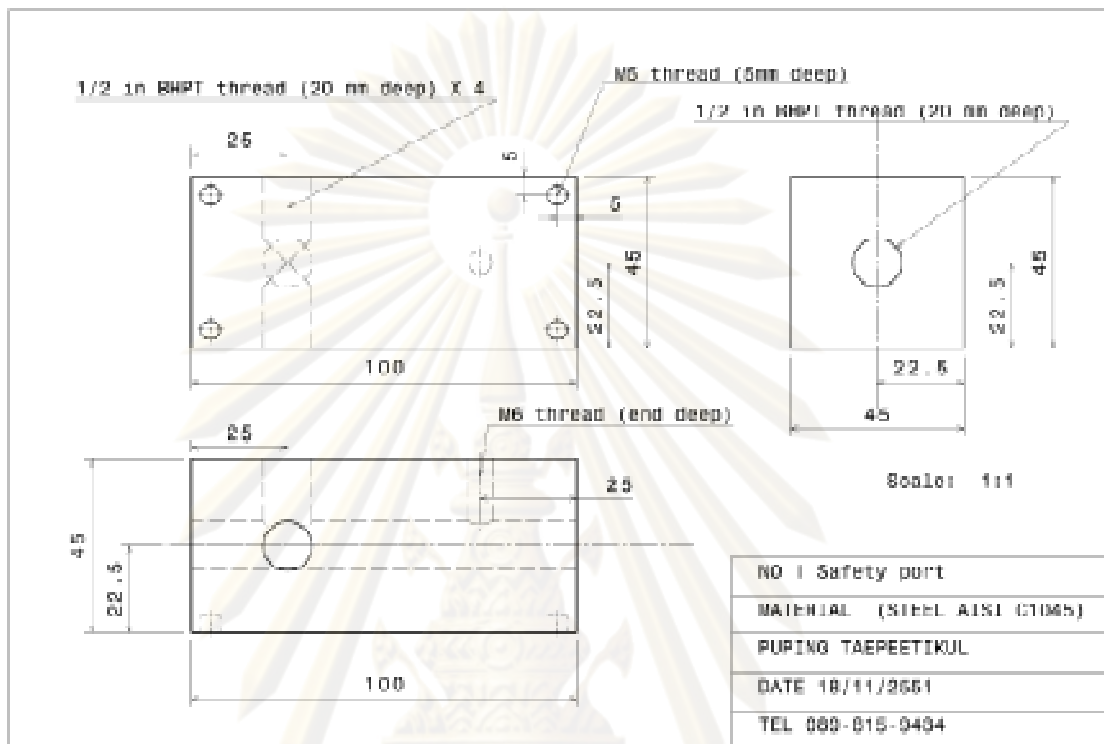


รูปที่ ก.14 แบบ Drawing (Geometrical detail) ของ MCLP

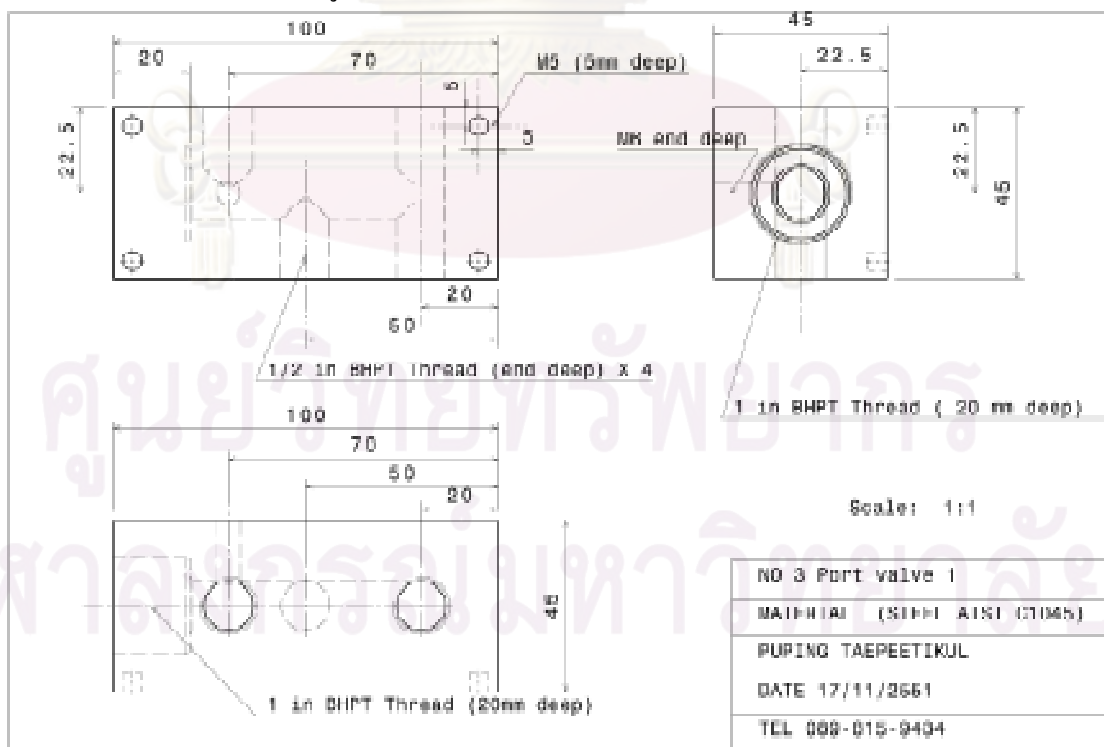


รูปที่ ก.15 แบบ Drawing ของ MCLP

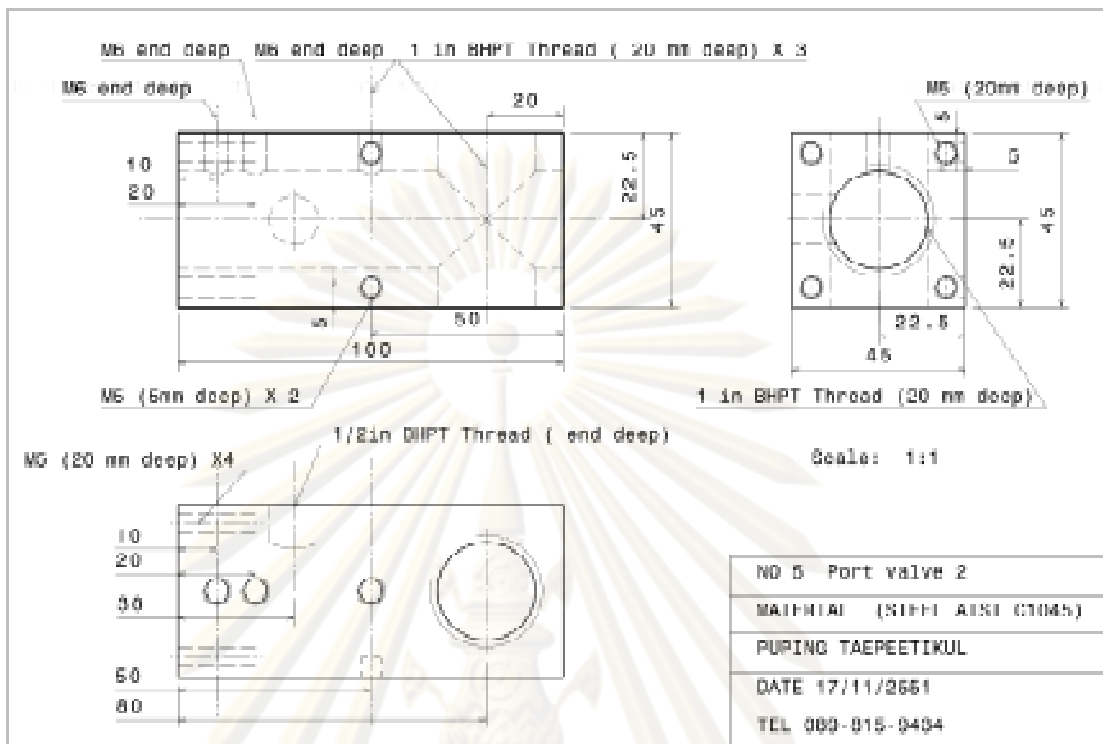
ก.2.3 แบบชิ้นส่วนที่เกี่ยวกับการประกอบระบบการไหล, โครงสร้างและอุปกรณ์สร้าง
ภาวะ



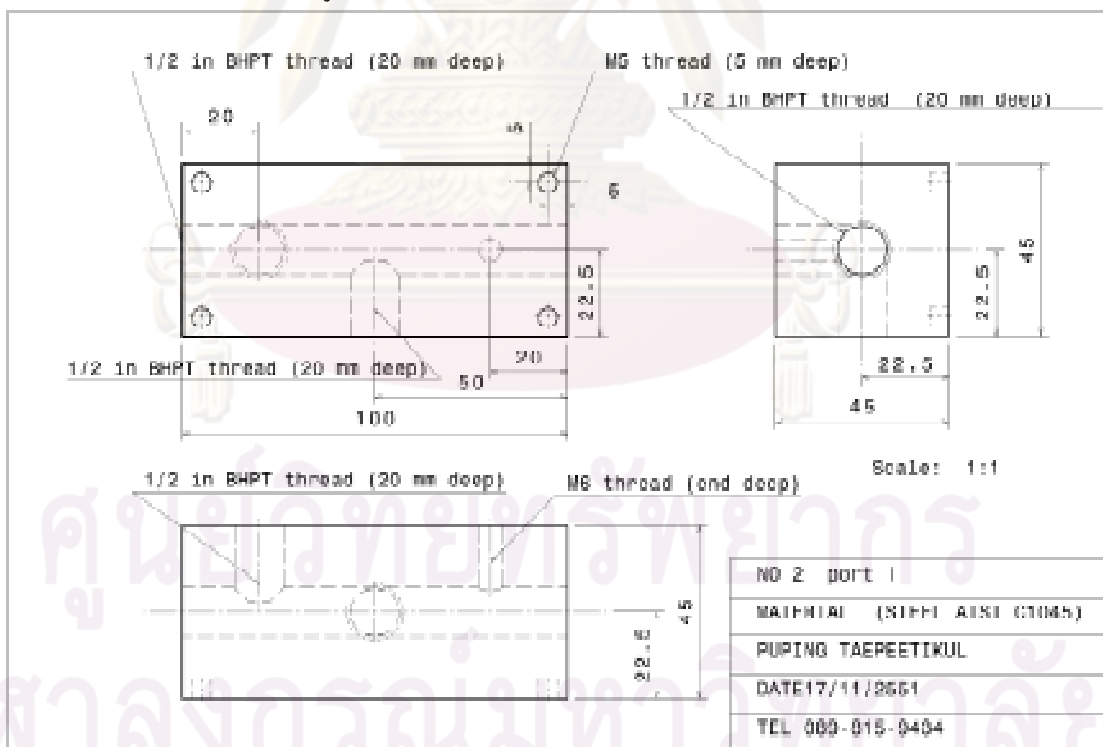
รูปที่ ก.16 แบบ Drawing ของ Safety port



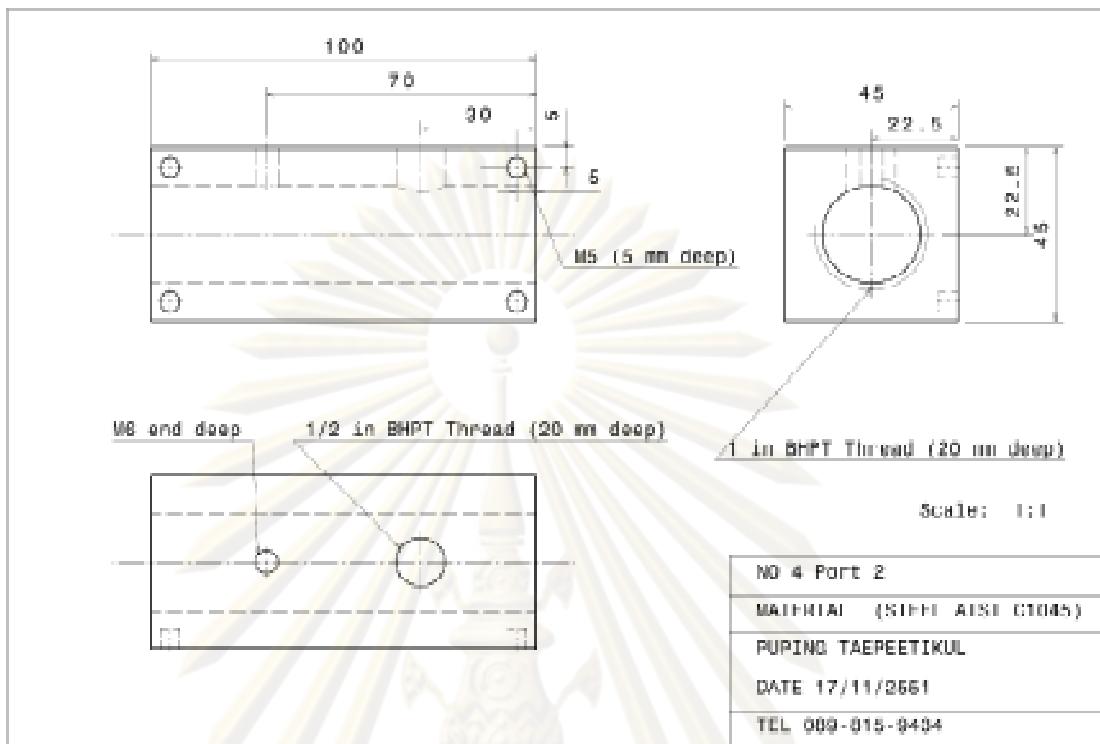
รูปที่ ก.17 แบบ Drawing ของ Port valve 1



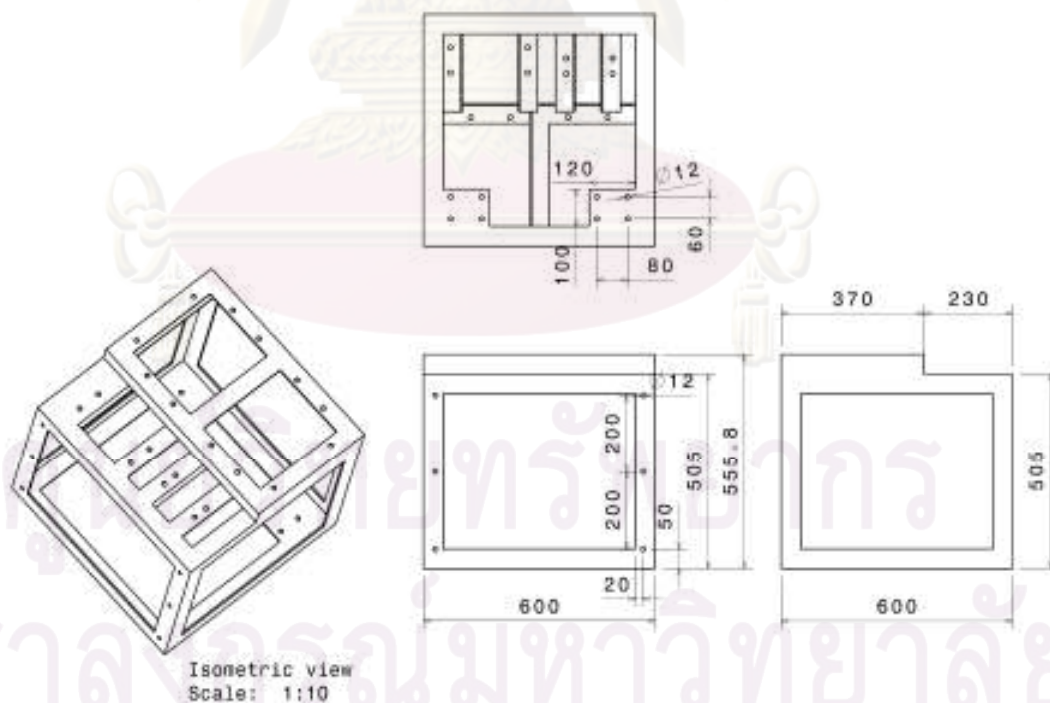
รูปที่ ก.18 แบบ Drawing ของ Port valve 2



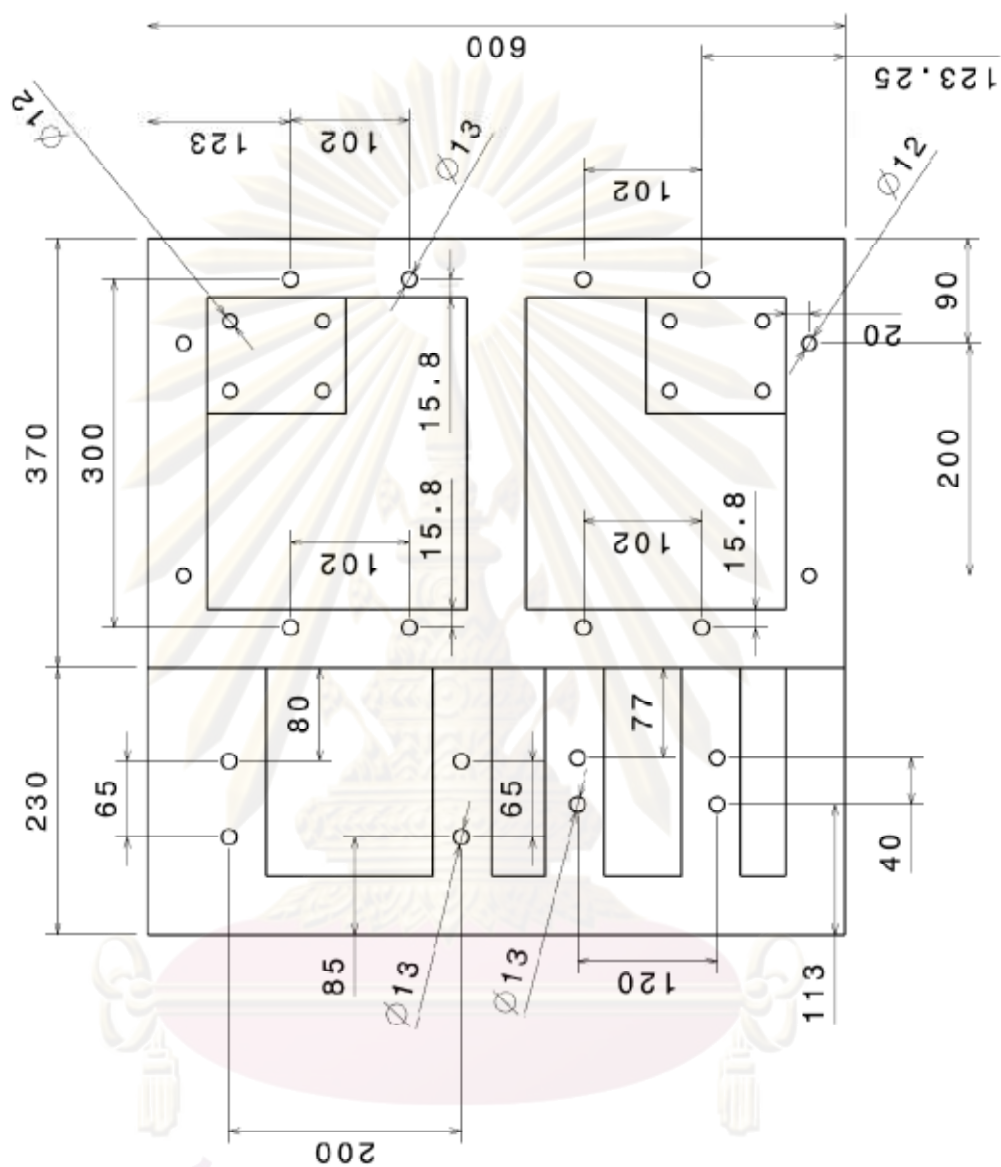
รูปที่ ก.19 แบบ Drawing ของ Port 1



รูปที่ ก.20 แบบ Drawing ของ Port 2

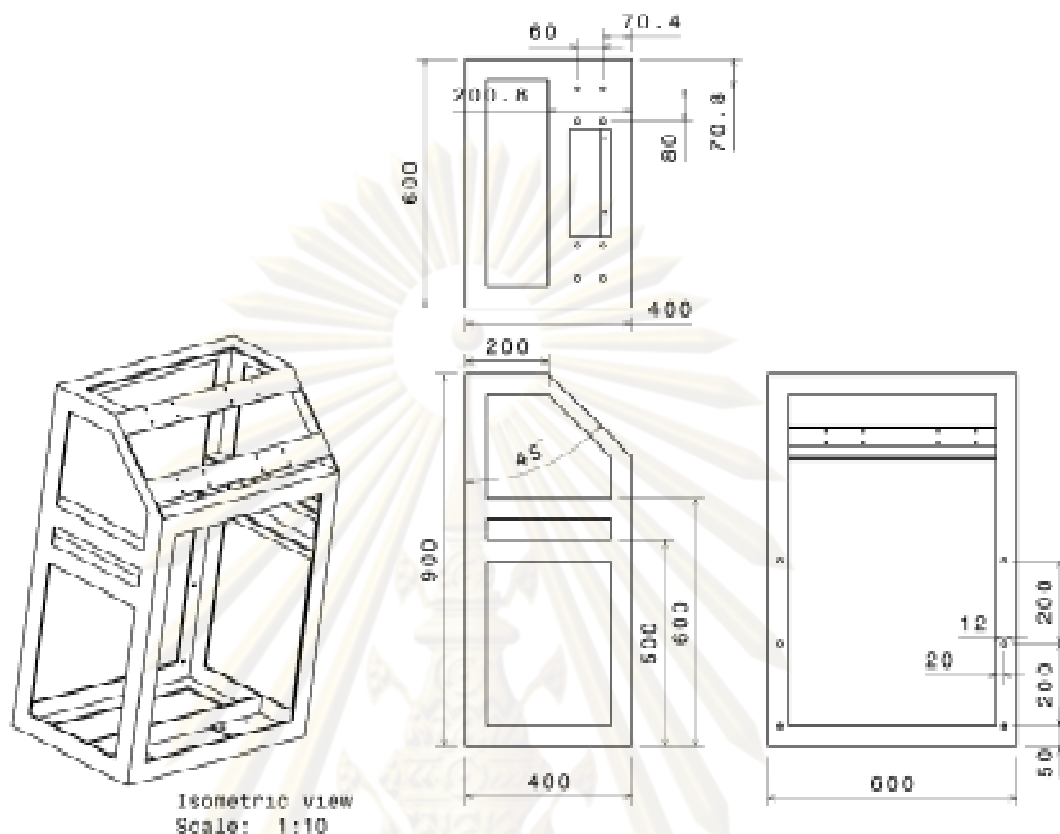


รูปที่ ก.20 แบบ Drawing ของ โครงสร้างที่ใช้เป็นฐานส่วนที่1

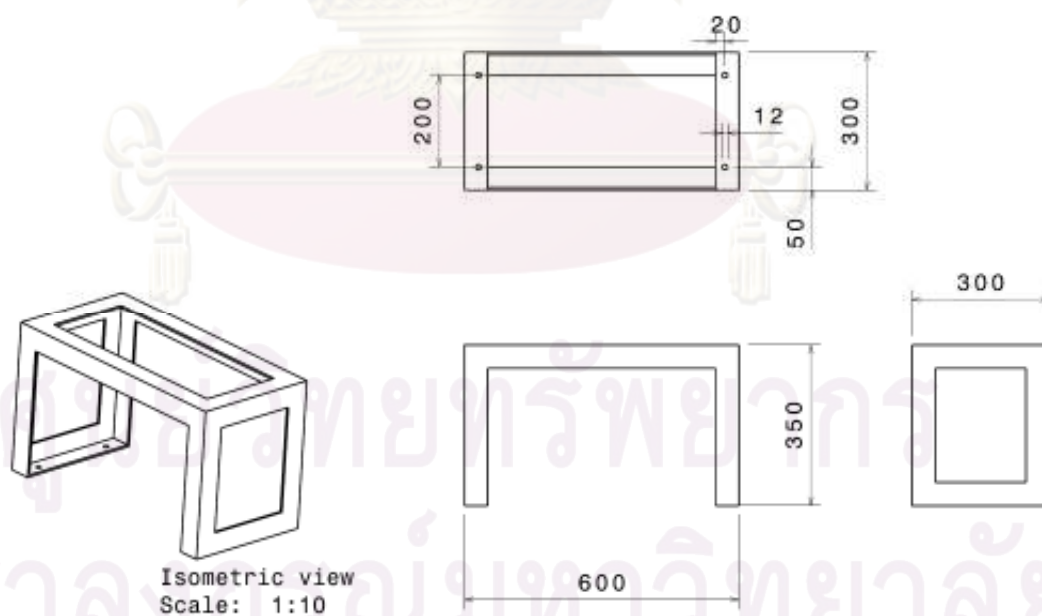


รูปที่ ก.21แบบ Drawing ของตำแหน่งรูเจาะบน โครงสร้างที่ใช้เป็นฐานส่วนที่1

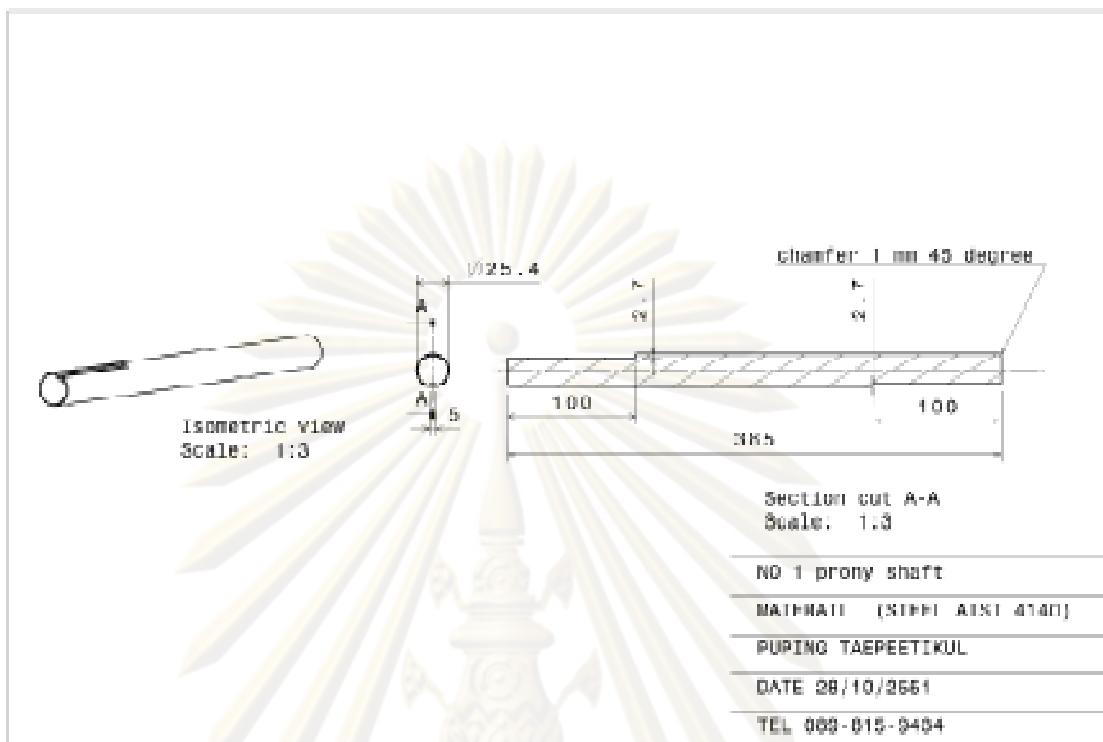
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



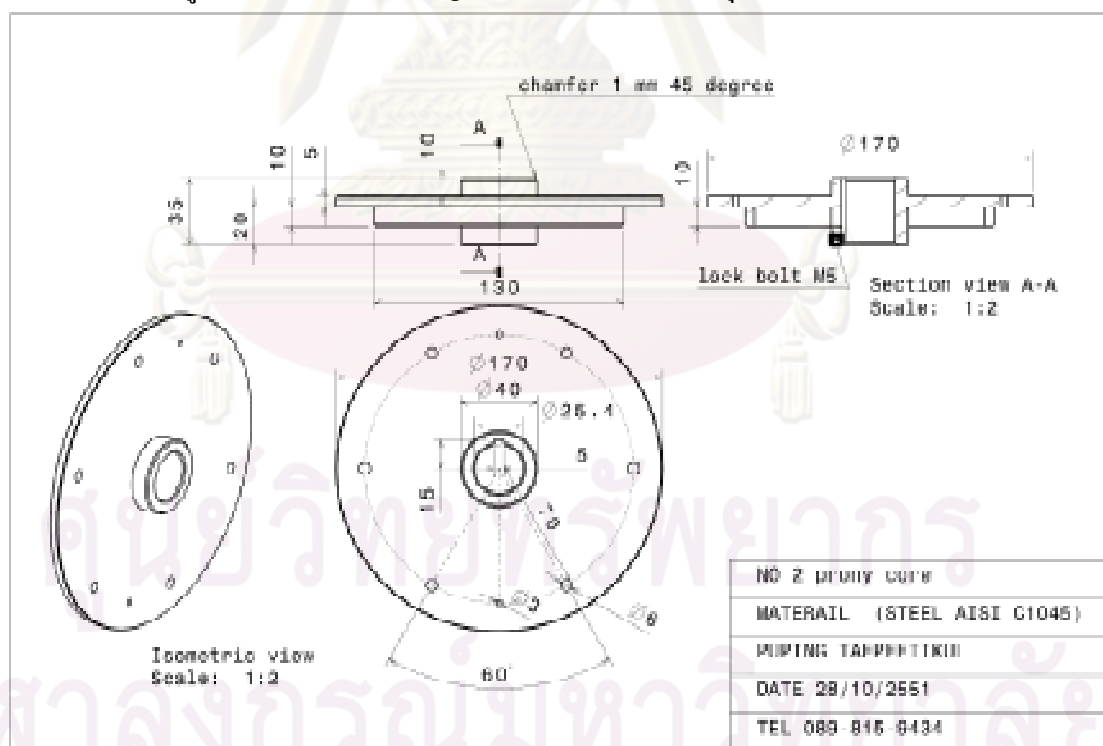
รูปที่ ก.22 แบบ Drawing ของ โครงสร้างที่ใช้เป็นฐานส่วนที่2



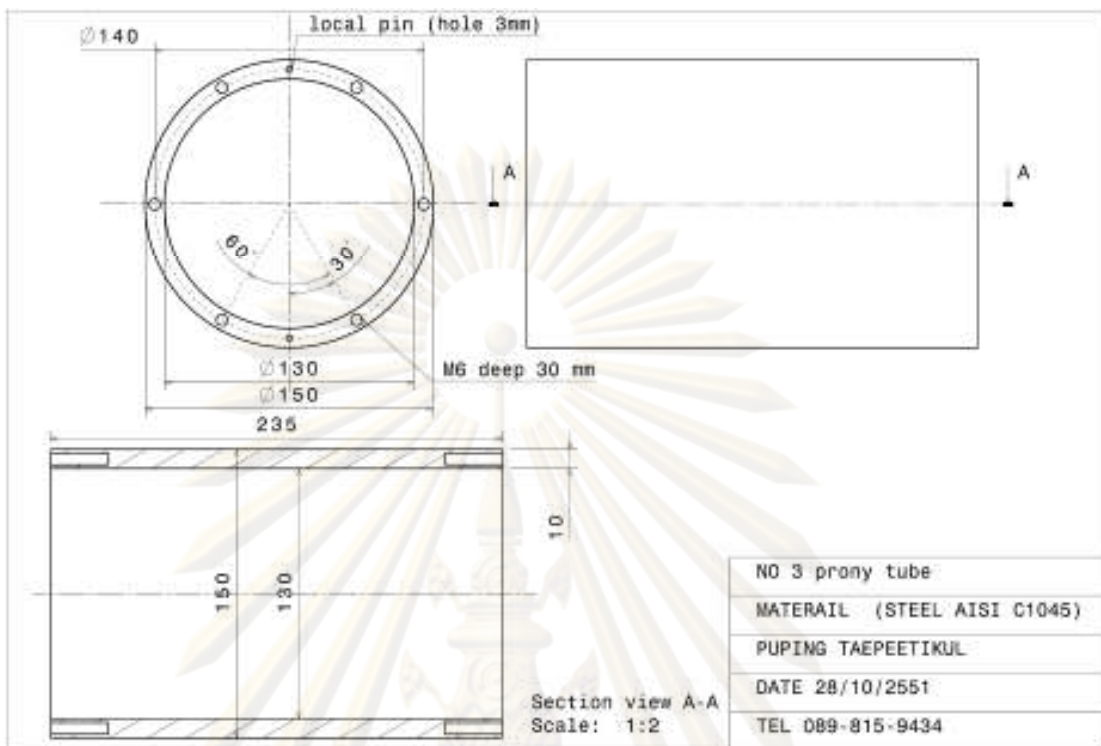
รูปที่ ก.23 แบบ Drawing ของ โครงสร้างที่ใช้เป็นฐานส่วนที่3



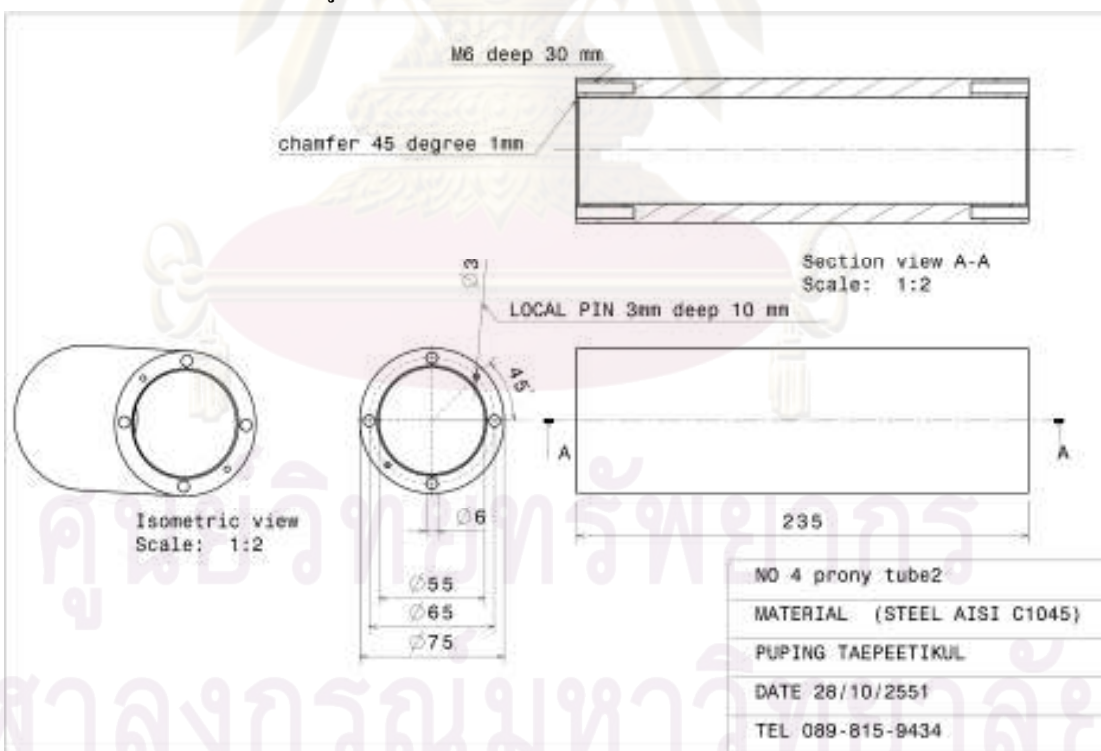
รูปที่ ก.24 แบบ Drawing ของ เพลาส่งกำลังของอุปกรณ์สร้างภาระ



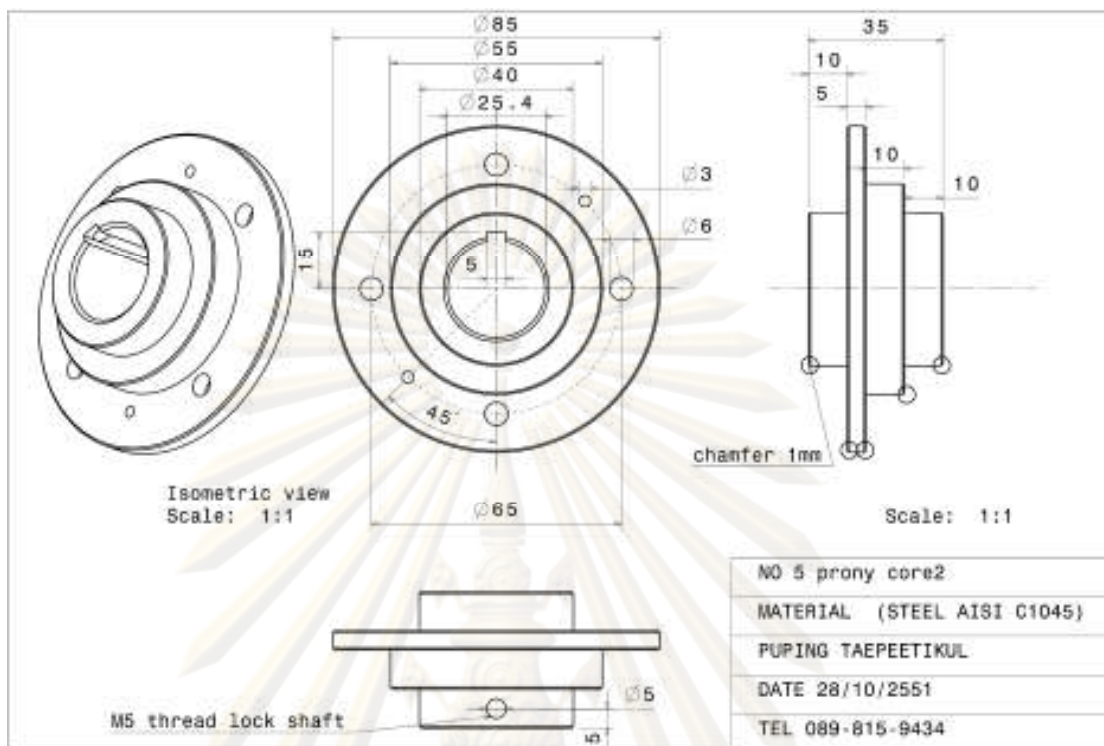
รูปที่ ก.25 แบบ Drawing ของ Prony core



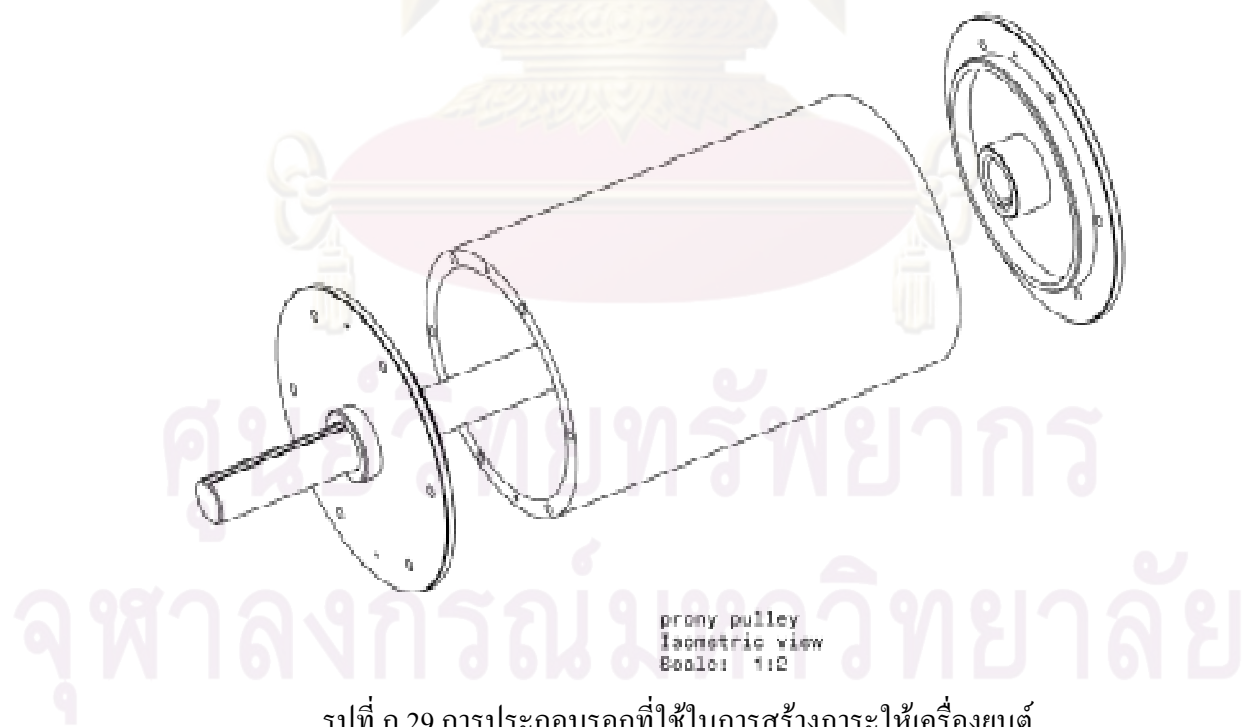
รูปที่ ก.26 แบบ Drawing ของ Prony tube



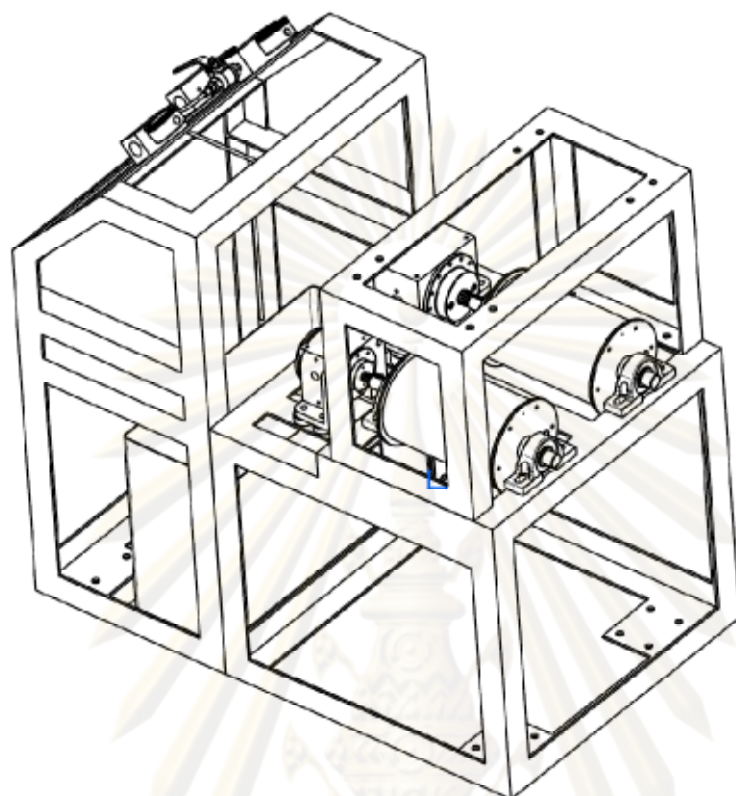
รูปที่ ก.27 แบบ Drawing ของ Prony tube 2



รูปที่ ก.28 แบบ Drawing ของ Prony core 2



รูปที่ ก.29 การประกอบรอกที่ใช้ในการสร้างภาระให้เครื่องยนต์



Isometric view
Scale: 1:7

รูปที่ ก.30 การประกอบชุดเครื่องยนต์ที่ใช้ในการวิจัย

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ข.

อุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย

ข.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย



รูปที่ ข.1 คอมพิวเตอร์แบบพกพา ระบบปฏิบัติการ Window xp



รูปที่ ข.2 เครื่องบันทึกสัญญาณ Fluke รุ่น hydra data logger



รูปที่ ข.3 เกจวัดความดันแบบ strain gauge (0-5000Psi)



รูปที่ ข.4 power supply 5VDC สำหรับ เกจวัดความดัน



รูปที่ ข.5 Heater fisher scientific รุ่น ISOTEMP 2150



รูปที่ ข.6 ท่อไฮดรอลิกอุตสาหกรรม ทนแรงดัน 160 บรรยากาศ



รูปที่ ข.7 -ข้อต่อไฮดรอลิกอุตสาหกรรม

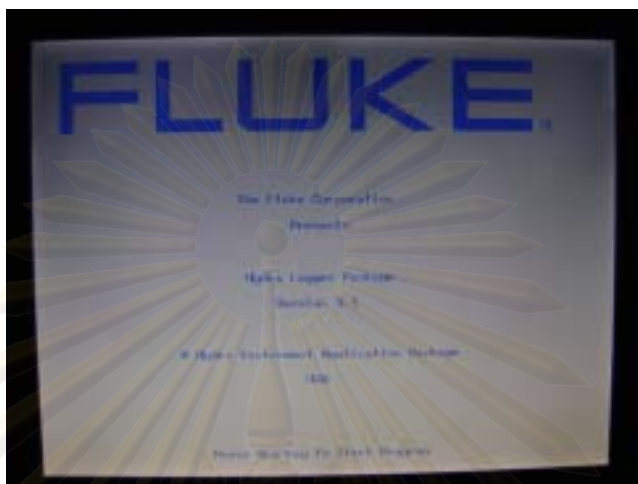


รูปที่ ข.8 -Pressure regulator Moris ปรับความดันจาก 0-3500 Psi เป็น 0-1000 Psi



รูปที่ ข.9 -ตาชั่งแบบสปริงสำหรับวัดแรงที่ได้จากการบิด

ข.2 การใช้โปรแกรมในการบันทึกค่าอุณหภูมิและความดัน



รูปที่ ข.10 ลักษณะของโปรแกรม ที่ใช้ในการบันทึกผลการทดลอง

โปรแกรมที่ใช้ในการบันทึกค่าเป็น โปรแกรมที่ใช้คู่กับ Data logger รุ่น Hydra data logger เป็น version 3.1 การใช้งานเริ่มจากจัดตั้งอุปกรณ์ thermocouple type K ตามตำแหน่งที่ต้องการวัดค่าและ เกจวัดความดันในตำแหน่งหัวถึงความดันสูง เมื่อติดตั้งเสร็จสิ้นแล้วจึง ดำเนินการ เซตค่าต่างๆใน โปรแกรมดังนี้



รูปที่ ข.11 เริ่มเซตค่าเครื่องมือวัด

เมื่อเข้าสู่โปรแกรมเลือก Setup Inst 1 เพื่อการเซตค่าอุปกรณ์การวัดให้ตรงกับ Port และ ประเภทของอุปกรณ์



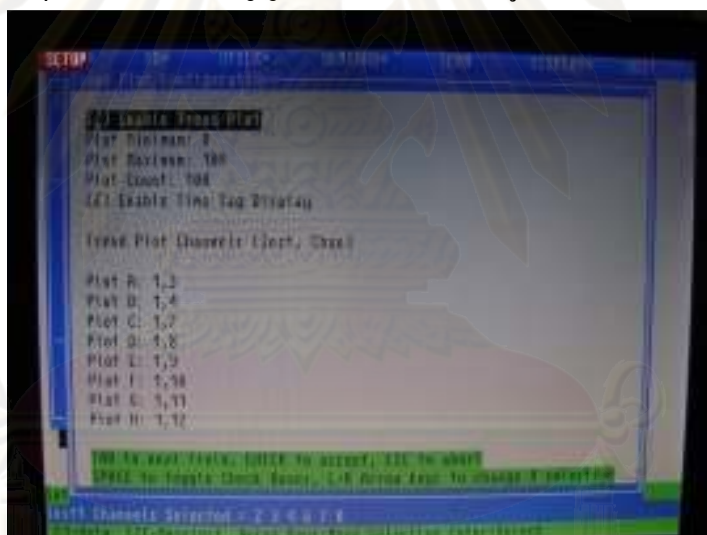
รูปที่ ข.12 เซตค่าประเภทอุปกรณ์วัดอุณหภูมิและเลือกช่องสัญญาณ
เมื่อกำหนด ค่า Setup Inst 1แล้วจึงกำหนด Chans Config---Done-Function---TC---K
หมายถึงการกำหนดค่าอุปกรณ์การวัดอุณหภูมิโดยสัญญาณมาจาก Thermo couple type K



รูปที่ ข.13 เซตค่าประเภทอุปกรณ์วัดความดันและเลือกช่องสัญญาณ
เมื่อกำหนด ค่า Setup Inst 1แล้วจึงกำหนด Chans Config---Done-Function---VDC---90mV
หมายถึงการกำหนดค่าอุปกรณ์การวัดความต่างศักย์ไฟฟ้ากระแสตรงที่มีค่าระหว่าง 0-90 mV โดย
สัญญาณมาจาก เกจวัดความดันแบบ Strain gauge



รูปที่ ข.14 เซตค่าอุปกรณ์เชื่อมต่อสัญญาณจาก data logger ตู้ computer ด้วย RS -232 COM 1



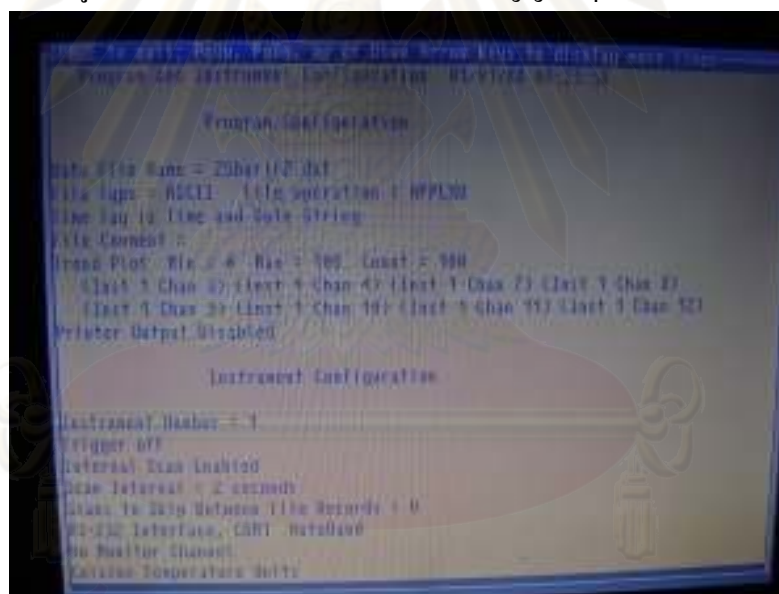
รูปที่ ข.15 เลือกช่องสัญญาณที่ได้เพื่อบันทึกค่าและเขียนกราฟแสดงผล

จากโปรแกรมที่ใช้ในการวิจัยจะเลือกบันทึกค่าจาก Thermo couple type K จำนวน 7 ช่องสัญญาณคือช่อง A,B,C,D,E,G และ H ส่วนค่าสัญญาณที่ได้จาก เกจวัดความดัน จะส่งไปที่ช่องสัญญาณ F

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ ข.15 เซตค่าช่วงเวลาการบันทึกสัญญาณทุกๆ 2วินาที



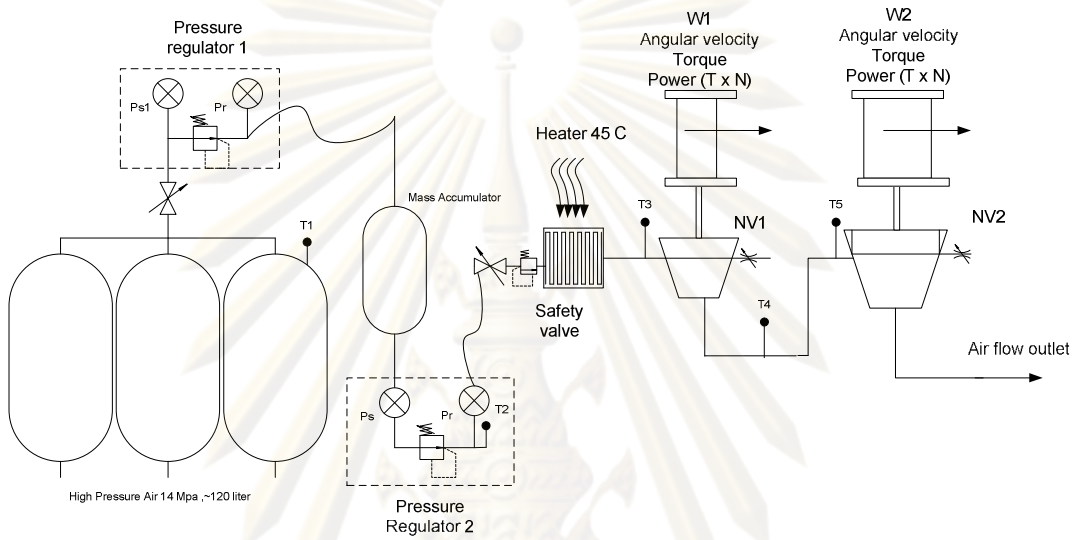
รูปที่ ข.16 ตรวจสอบค่าที่เซต จาก Show setup

พิจารณาค่าที่เซตในโปรแกรมการบันทึกว่าตรงตามความต้องการหรือไม่ก่อนเริ่มบันทึกสัญญาณ โดยการเลือก Show setup

ภาคผนวก ค.

อุณหภูมิและการลดลงของมวลภายในถังความดัน

ค.1 อุณหภูมิที่จุดต่างๆและการลดลงของมวลภายในถังความดันของระบบเครื่องยนต์



รูปที่ ค.1 แผนผังการไหลของก๊าซในระบบและจุดวัดอุณหภูมิต่างๆ

Ps_1 คือ ความดันที่เหลื่อภายในถังความดันสูง (Pa) (ใช้ในการคำนวณมวลที่เหลื่อภายในถัง)

Pr คือ ความดันของก๊าซภายหลังปรับลดความดัน โดยRegulator ตัวที่สองแล้ว (Pa)

T_1 คือ อุณหภูมิข้างถังความดัน © (ใช้ในการคำนวณมวลที่เหลื่อภายในถัง)

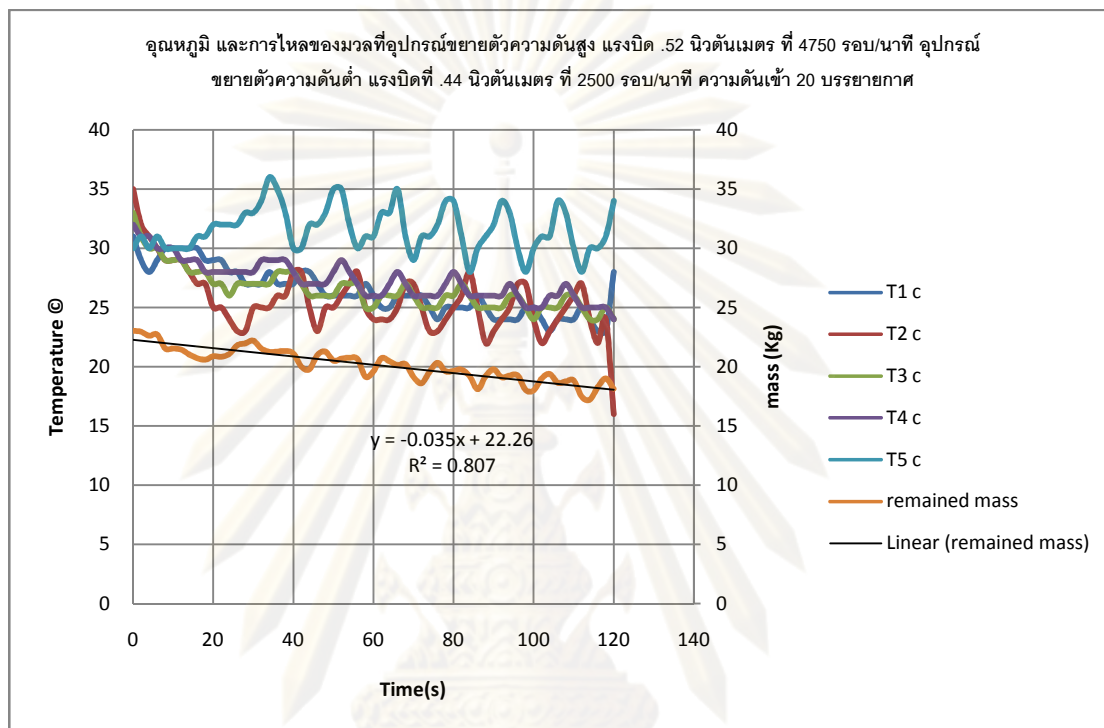
T_2 คือ อุณหภูมิภายหลังปรับลดความดัน โดย Regulator ตัวที่สองแล้ว ©

T_3 คือ อุณหภูมิภายหลังออกจากท่อทองแดงที่แช่ภายในน้ำควบคุมอุณหภูมิที่ 45 องศาเซลเซียส หรือก่อนเข้าสู่อุปกรณ์ขยายตัวความดันสูง ©

T_4 คือ อุณหภูมิออกจากอุปกรณ์ขยายตัวความดันสูง ©

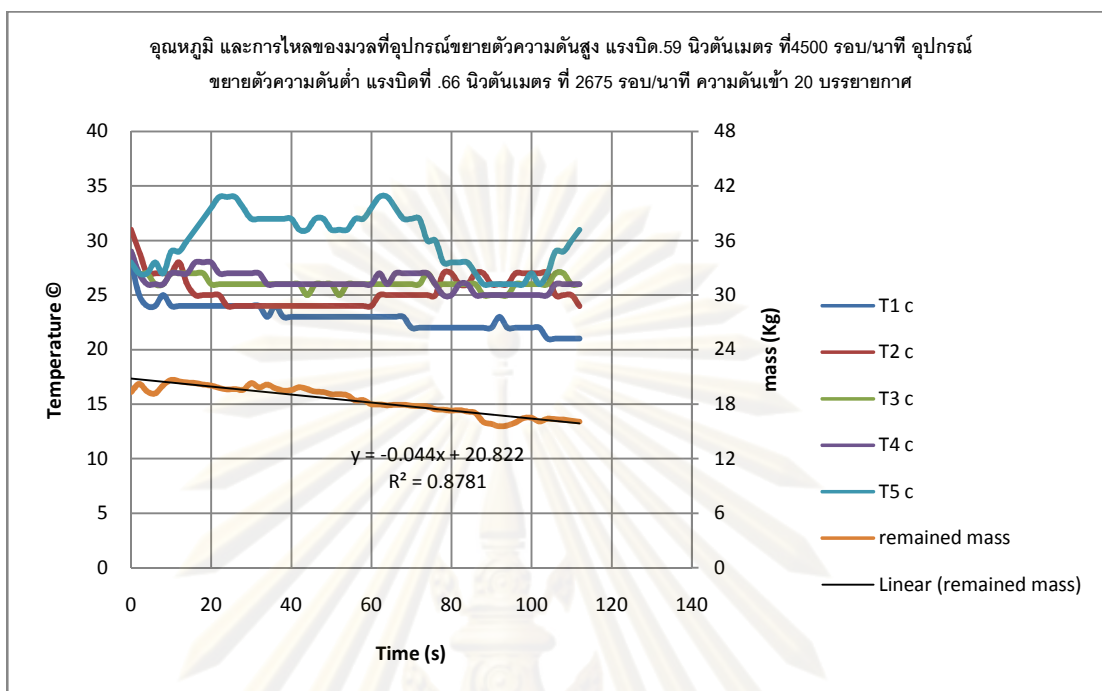
T_5 คือ อุณหภูมิก่อนเข้าสู่อุปกรณ์ขยายตัวความดันสูง ©

**ค.1.1 อุณหภูมิที่จุดต่างๆและการลดลงของมวลภายในถังความดันของระบบเครื่องยนต์
เมื่อ ความดันก่อนเข้าระบบ คือ 2 MPa (20 บรรยากาศ)**

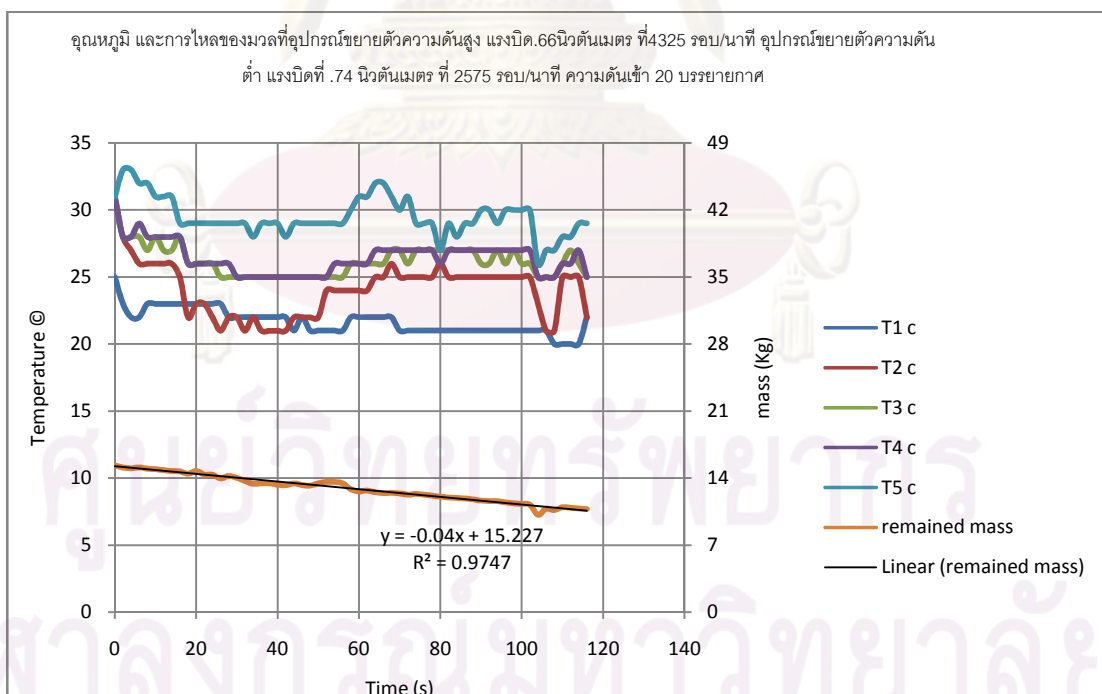


รูปที่ ค.2 อุณหภูมิ และการไหลของมวลที่อุปกรณ์ขยายตัวความดันสูง แรงบิด .52 นิวตันเมตร ที่ 4750 รอบ/นาที อุปกรณ์ขยายตัวความดันต่ำ แรงบิดที่ .44 นิวตันเมตร ที่ 2500 รอบ/นาที ความดันเข้า 20 บรรยากาศ

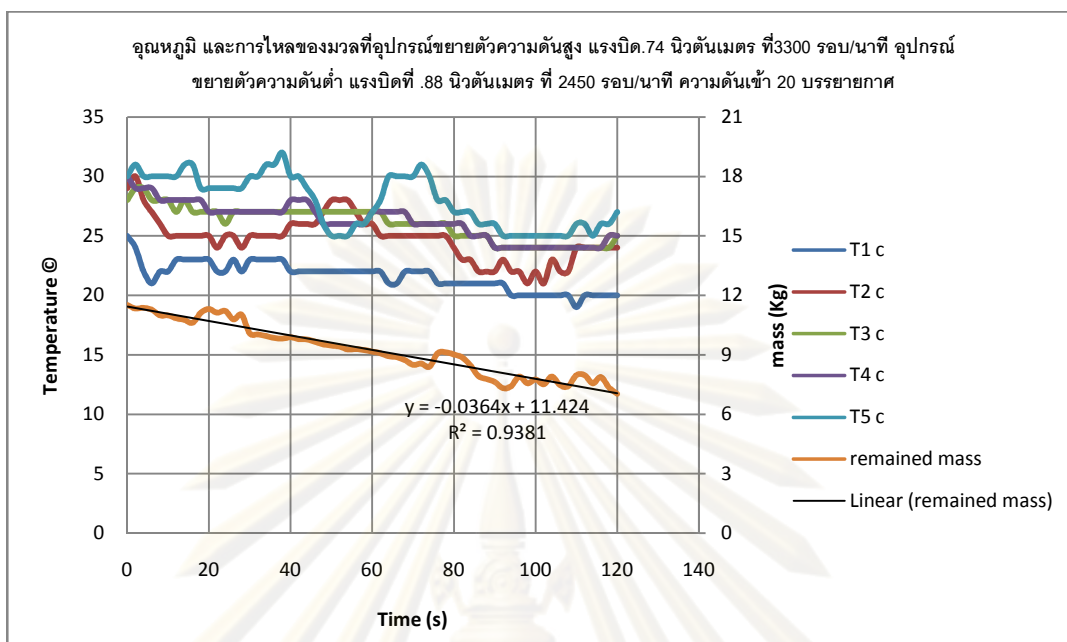
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



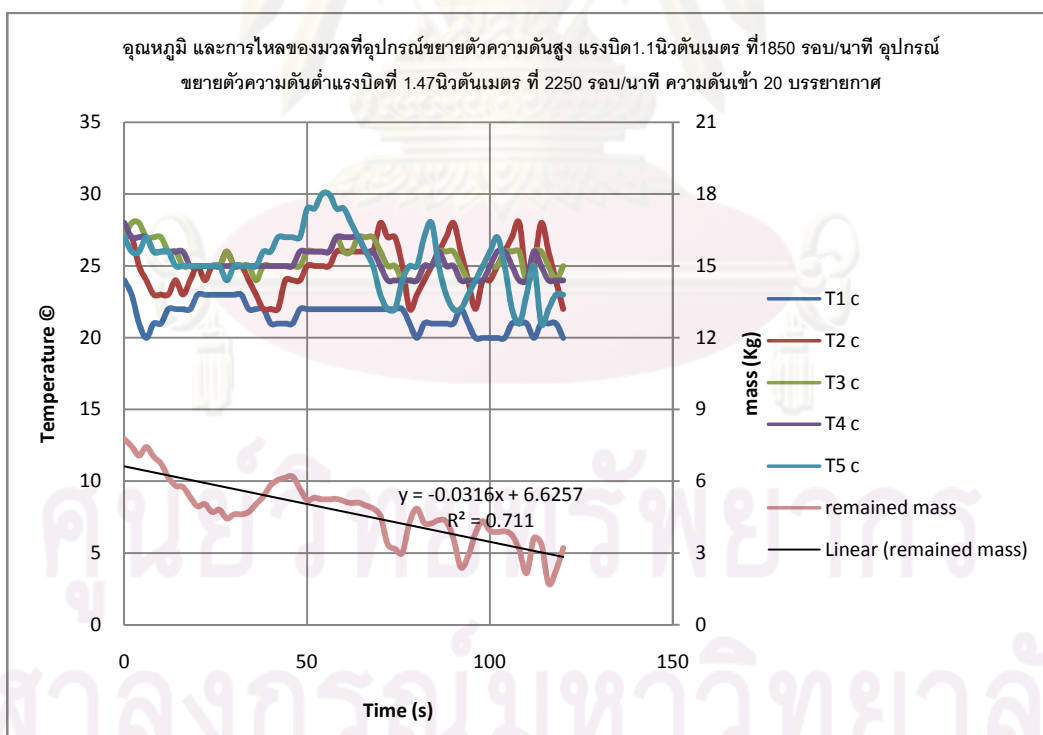
รูปที่ ค.3 อุณหภูมิ และการไหลของมวลที่อุปกรณ์ขยายตัวความดันสูง แรงบิด.59 นิวตันเมตร ที่ 4500 รอบ/นาที อุปกรณ์ขยายตัวความดันต่ำ แรงบิดที่ .66 นิวตันเมตร ที่ 2675 รอบ/นาที ความดันเข้า 20 บรรยากาศ



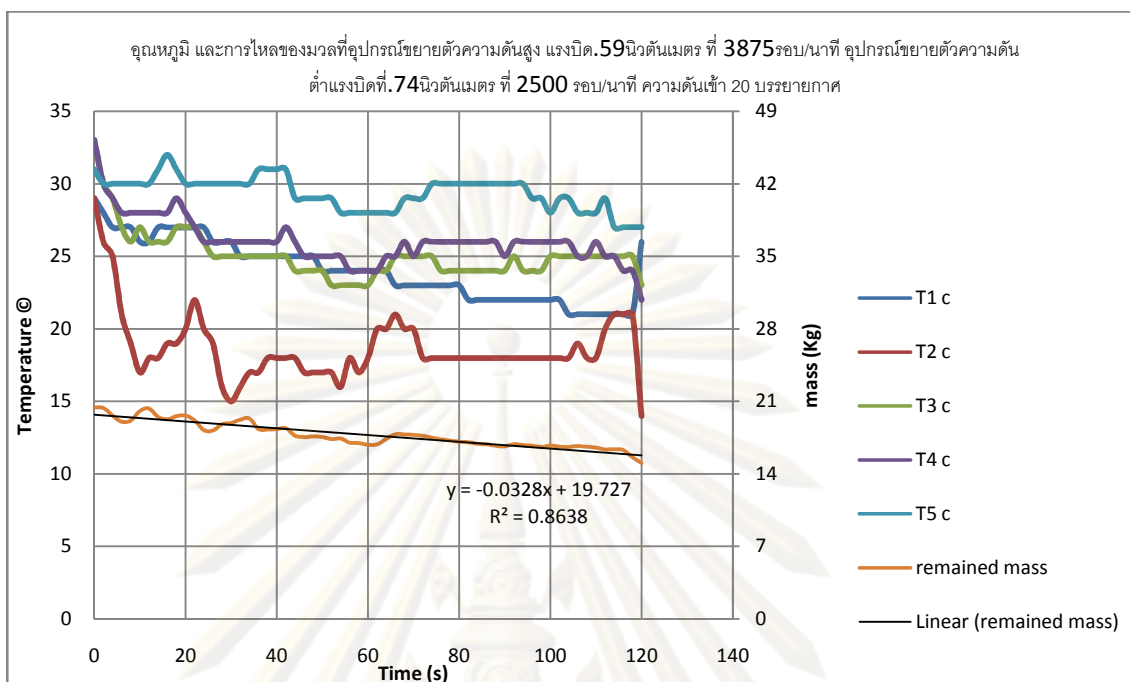
รูปที่ ค.4 อุณหภูมิ และการไหลของมวลที่อุปกรณ์ขยายตัวความดันสูง แรงบิด.66นิวตันเมตร ที่ 4325 รอบ/นาที อุปกรณ์ขยายตัวความดันต่ำ แรงบิดที่ .74 นิวตันเมตร ที่ 2575 รอบ/นาที ความดันเข้า 20 บรรยากาศ



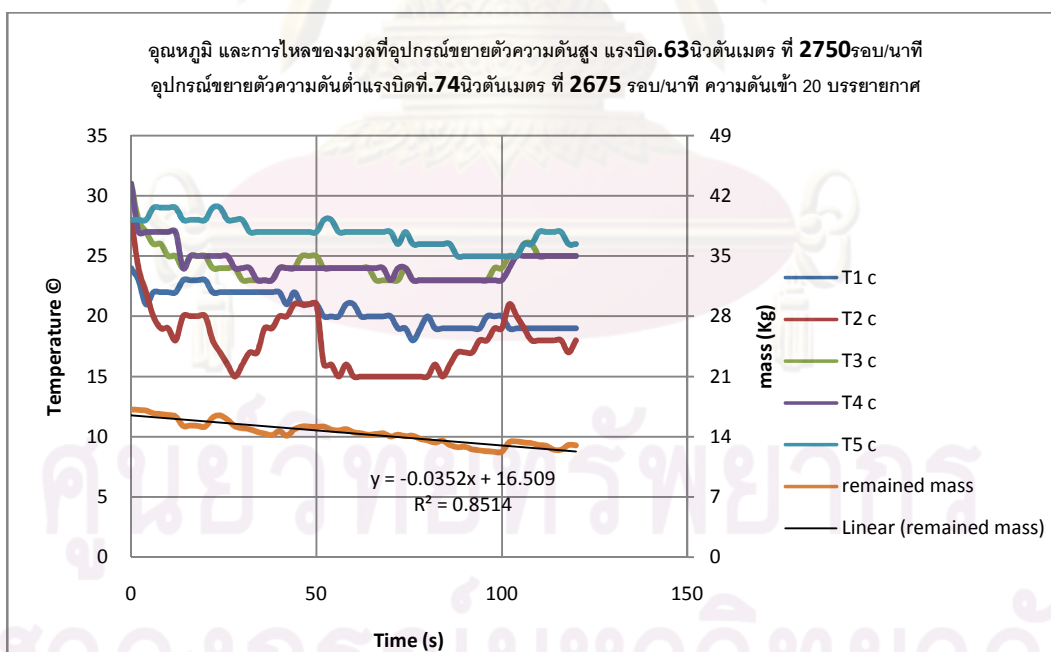
รูปที่ ค.5 อุณหภูมิ และการไหลของมวลที่อุปกรณ์ขยายตัวความดันสูง แรงบิด.74 นิวตันเมตร ที่ 3300 รอบ/นาที อุปกรณ์ขยายตัวความดันต่ำ แรงบิดที่ .88 นิวตันเมตร ที่ 2450 รอบ/นาที ความดันเข้า 20 บรรยากาศ



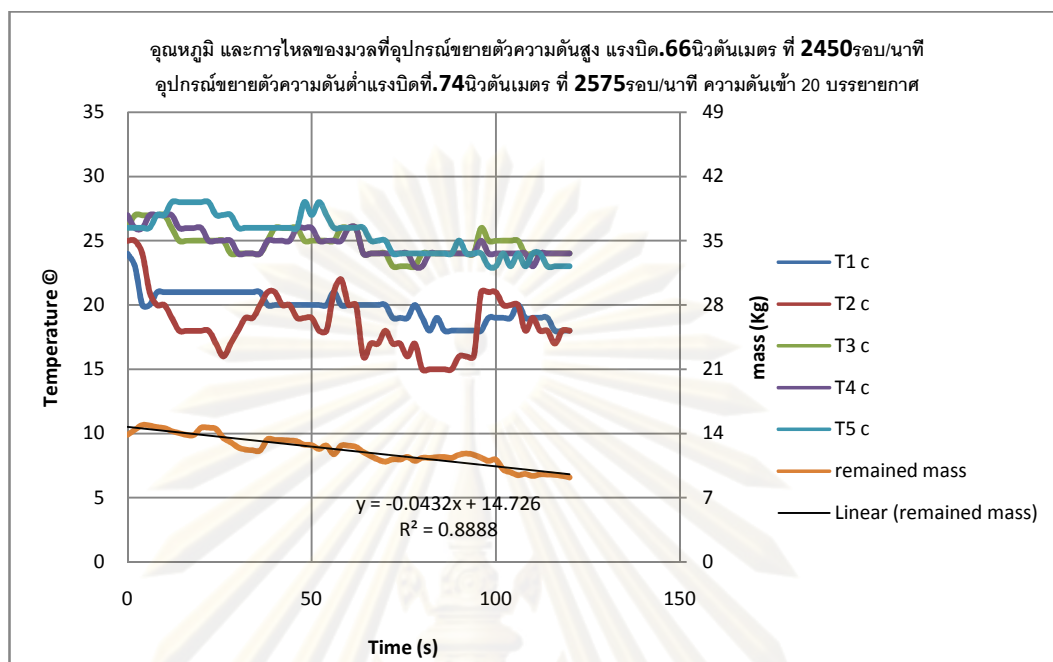
รูปที่ ค.6 อุณหภูมิ และการไหลของมวลที่อุปกรณ์ขยายตัวความดันสูง แรงบิด1.1นิวตันเมตร ที่ 1850 รอบ/นาที อุปกรณ์ขยายตัวความดันต่ำแรงบิดที่ 1.47นิวตันเมตร ที่ 2250 รอบ/นาที ความดันเข้า 20 บรรยากาศ



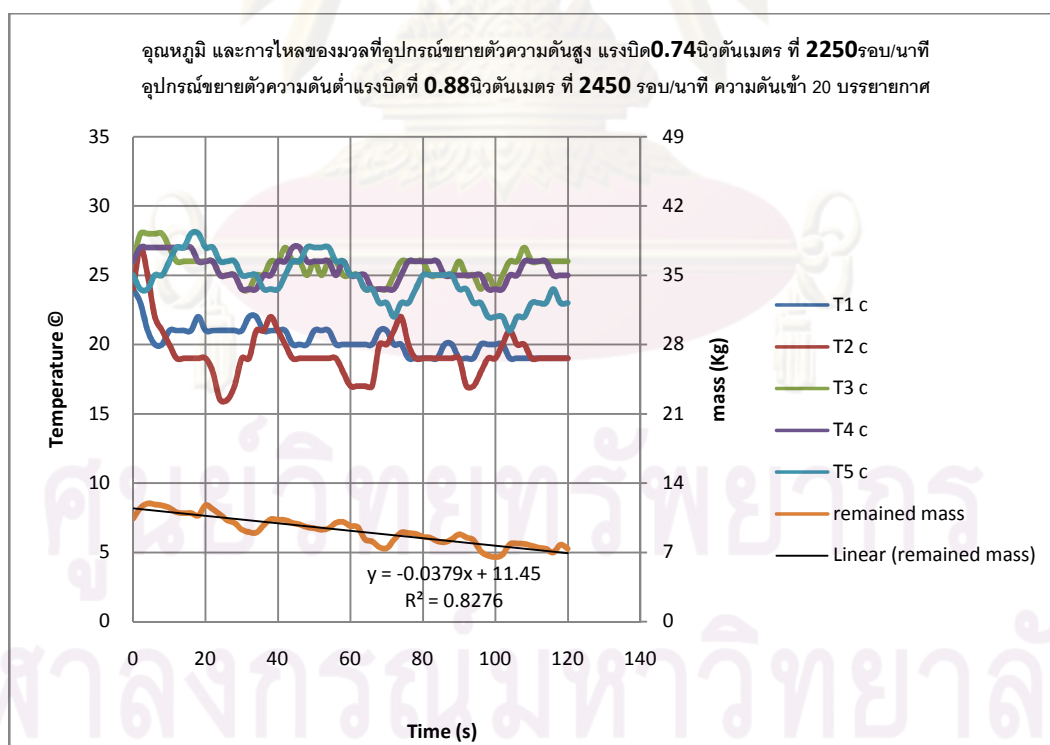
รูปที่ ค.7 อุณหภูมิ และการไหลของมวลที่อุปกรณ์ขยายตัวความดันสูง แรงบิด.59นิวตันเมตร ที่ 3875รอบ/นาที อุปกรณ์ขยายตัวความดันต่ำแรงบิดที่.74นิวตันเมตร ที่ 2500 รอบ/นาที ความดันเข้า 20 บรรยากาศ



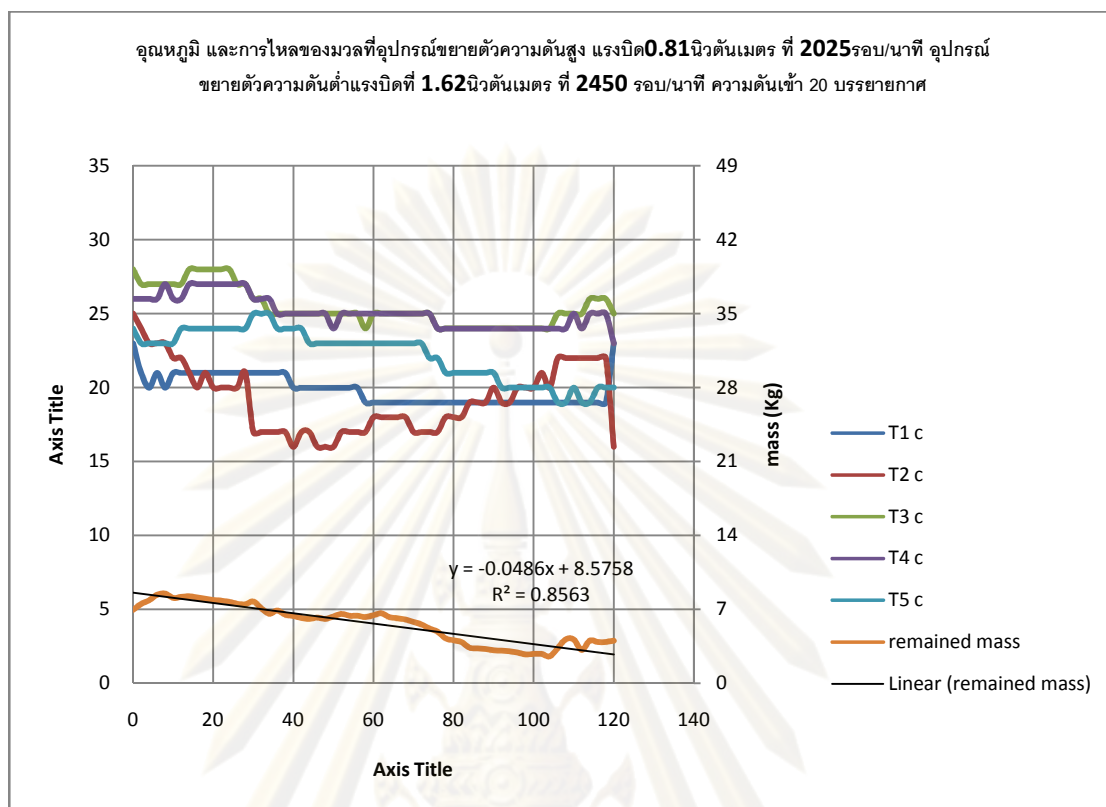
รูปที่ ค.8 อุณหภูมิ และการไหลของมวลที่อุปกรณ์ขยายตัวความดันสูง แรงบิด.63นิวตันเมตร ที่ 2750รอบ/นาที อุปกรณ์ขยายตัวความดันต่ำแรงบิดที่.74นิวตันเมตร ที่ 2675 รอบ/นาที ความดันเข้า 20 บรรยากาศ



รูปที่ ค.9 อุณหภูมิ และการไหลของมวลที่อุปกรณ์ขยายตัวความดันสูง แรงบิด.66นิวตันเมตร ที่ 2450รอบ/นาที อุปกรณ์ขยายตัวความดันต่ำแรงบิดที่.74นิวตันเมตร ที่ 2575รอบ/นาที ความดันเข้า 20 บรรยากาศ



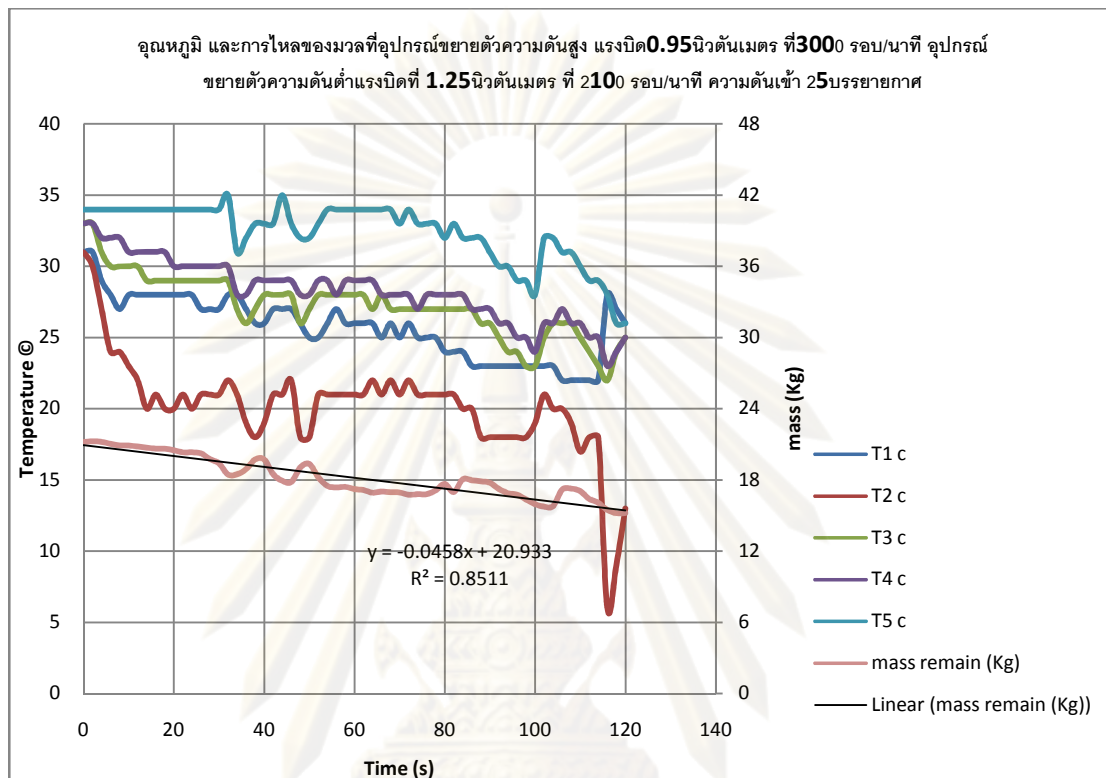
รูปที่ ค.10 อุณหภูมิ และการไหลของมวลที่อุปกรณ์ขยายตัวความดันสูง แรงบิด0.74นิวตันเมตร ที่ 2250รอบ/นาที อุปกรณ์ขยายตัวความดันต่ำแรงบิดที่ 0.88นิวตันเมตร ที่ 2450 รอบ/นาที ความดันเข้า 20 บรรยากาศ



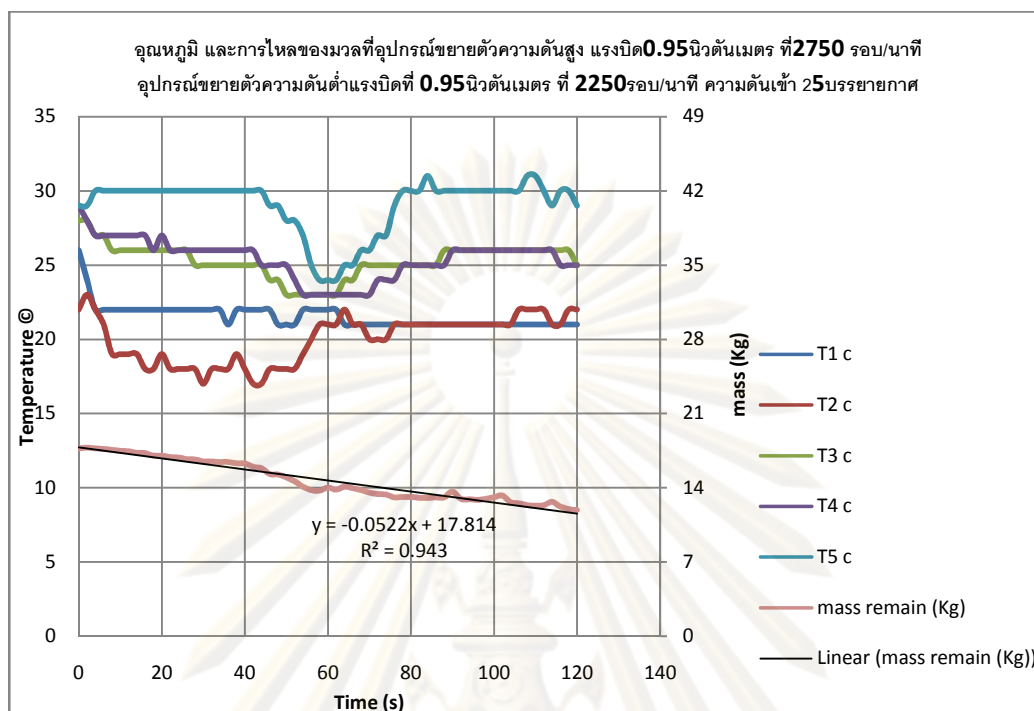
รูปที่ ค.11 อุณหภูมิ และการไหลของมวลที่อุปกรณ์ขยายตัวความดันสูง แรงบิด**0.81**นิวตันเมตร ที่ 2025รอบ/นาที อุปกรณ์ขยายตัวความดันต่ำแรงบิดที่ **1.62**นิวตันเมตร ที่ **2450** รอบ/นาที ความดันเข้า 20 บรรยากาศ

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

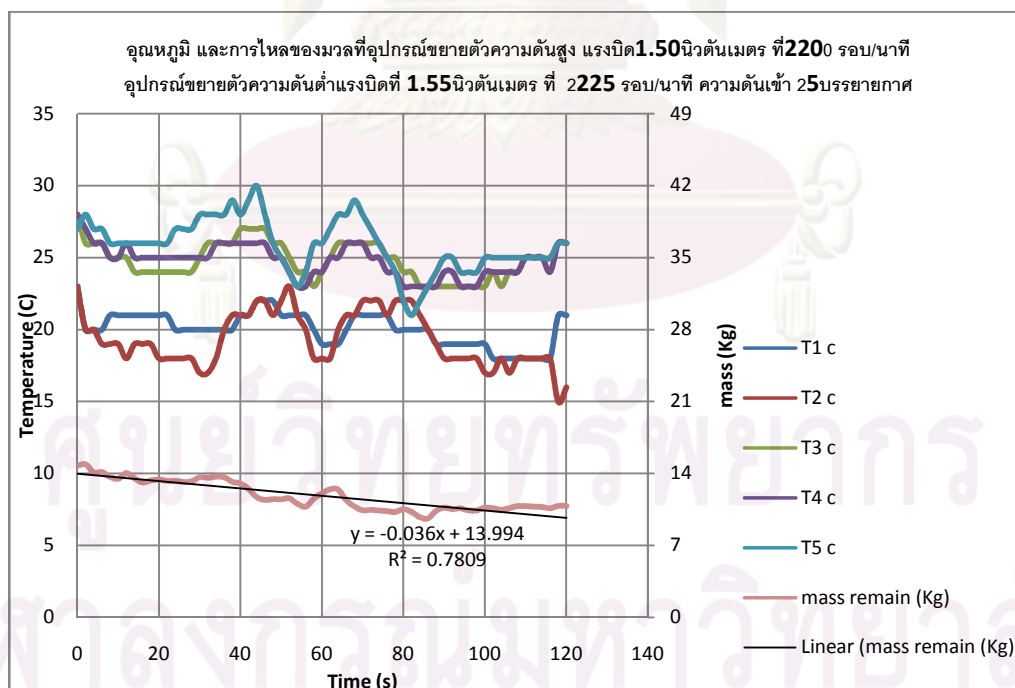
**ค.1.2 อุณหภูมิที่จุดต่างๆและการลดลงของมวลภายในถึงความดันของระบบเครื่องยนต์
เมื่อ ความดันก่อนเข้าระบบ คือ 2.5 MPa (25 บรรยากาศ)**



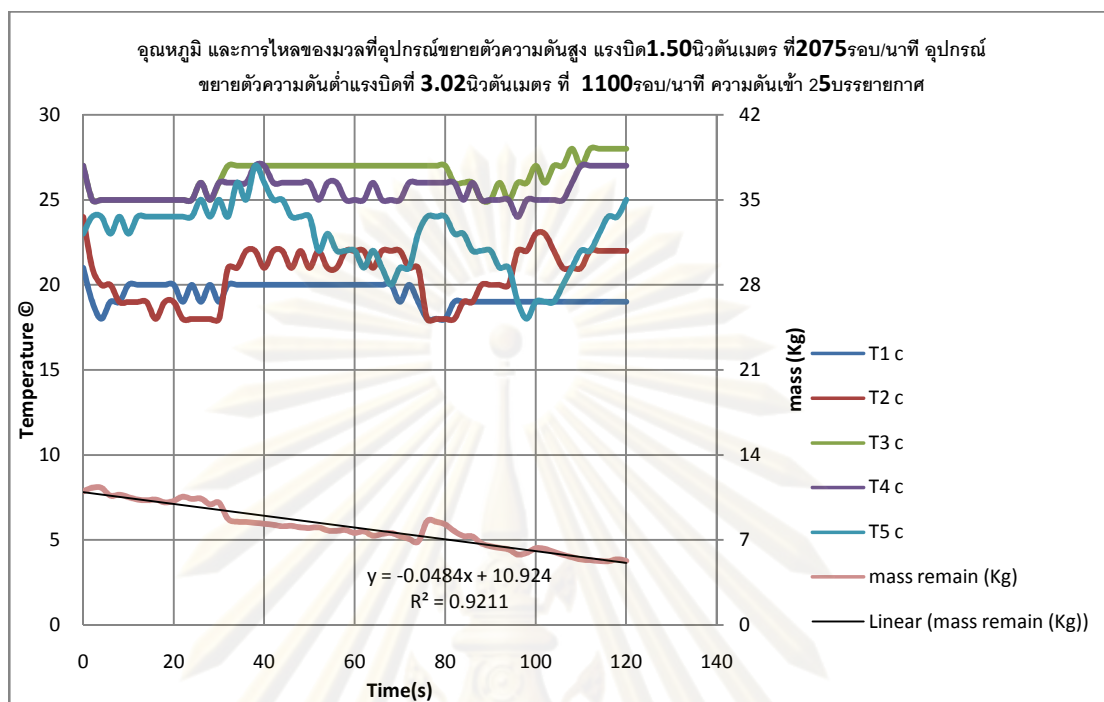
รูปที่ ค.12 อุณหภูมิ และการไหลของมวลที่อุปกรณ์ขยายตัวความดันสูง แรงบิด0.95นิวตันเมตร ที่ 3000 รอบ/นาที อุปกรณ์ขยายตัวความดันต่ำแรงบิดที่ 1.25นิวตันเมตร ที่ 2100 รอบ/นาที ความดันเข้า 25บรรยากาศ



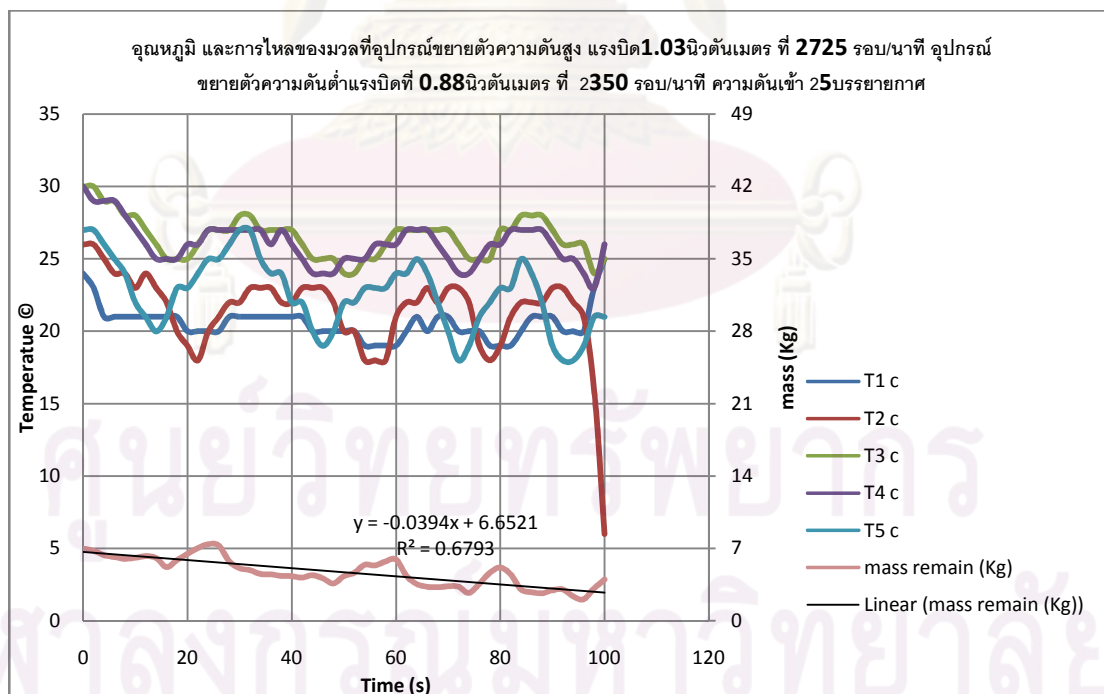
รูปที่ ค.13 อุณหภูมิ และการไหลของมวลที่อุปกรณ์ขยายตัวความดันสูง แรงบิด**0.95**นิวตันเมตร ที่ 2750 รอบ/นาที อุปกรณ์ขยายตัวความดันต่ำแรงบิดที่ **0.95**นิวตันเมตร ที่ **2250**รอบ/นาที ความดันเข้า 25บรรยากาศ



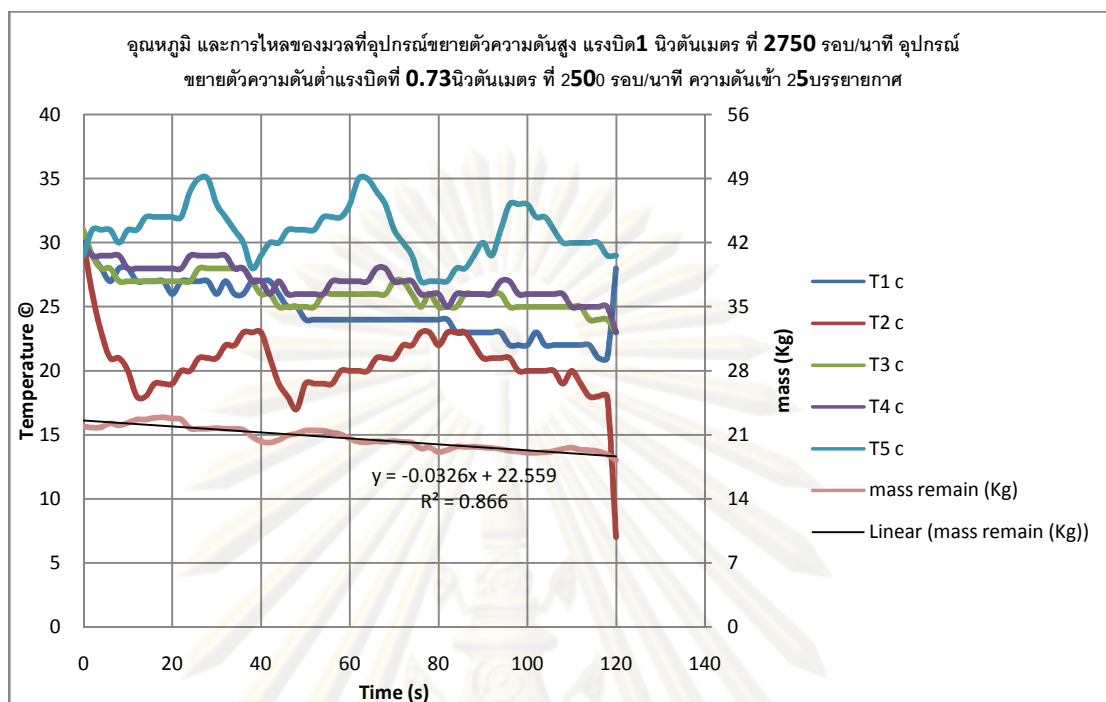
รูปที่ ค.14 อุณหภูมิ และการไหลของมวลที่อุปกรณ์ขยายตัวความดันสูง แรงบิด**1.50**นิวตันเมตร ที่ 2200 รอบ/นาที อุปกรณ์ขยายตัวความดันต่ำแรงบิดที่ **1.55**นิวตันเมตร ที่ **2225** รอบ/นาที ความดันเข้า 25บรรยากาศ



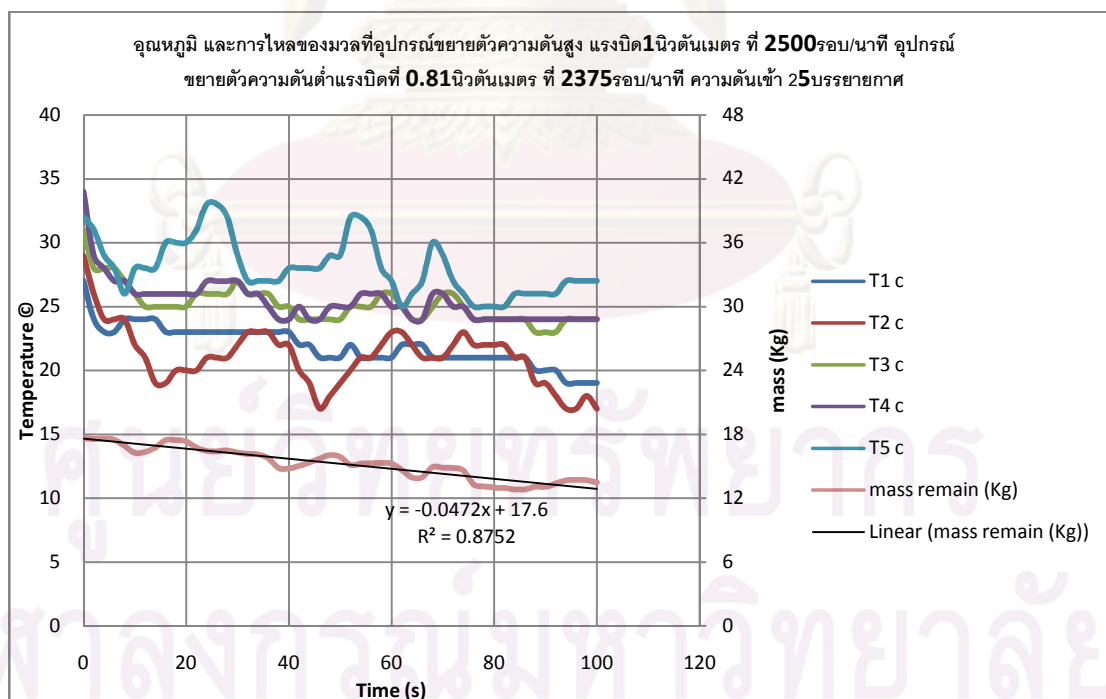
รูปที่ ค.15 อุณหภูมิ และการไหลของมวลที่อุปกรณ์ขยายตัวความดันสูง แรงบิด**1.50**นิวตันเมตร ที่ 2075รอบ/นาที อุปกรณ์ขยายตัวความดันต่ำแรงบิดที่ **3.02**นิวตันเมตร ที่ **1100**รอบ/นาที ความดันเข้า 25บรรยากาศ



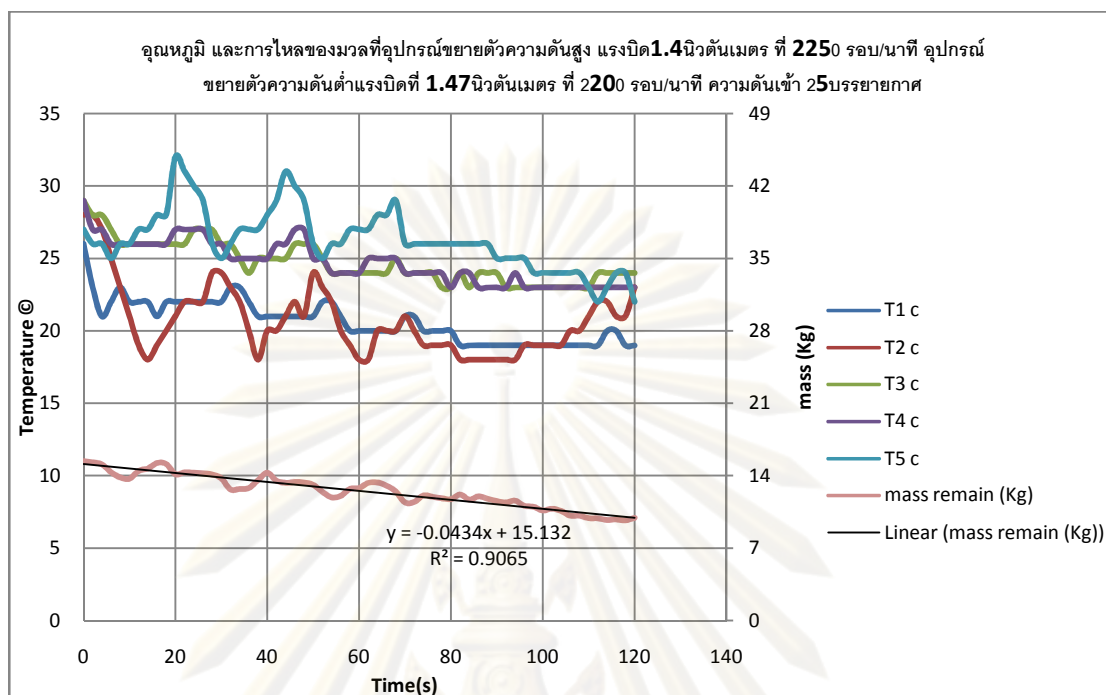
รูปที่ ค.16 อุณหภูมิ และการไหลของมวลที่อุปกรณ์ขยายตัวความดันสูง แรงบิด**1.03**นิวตันเมตร ที่ 2725 รอบ/นาที อุปกรณ์ขยายตัวความดันต่ำแรงบิดที่ **0.88**นิวตันเมตร ที่ **2350** รอบ/นาที ความดันเข้า 25บรรยากาศ



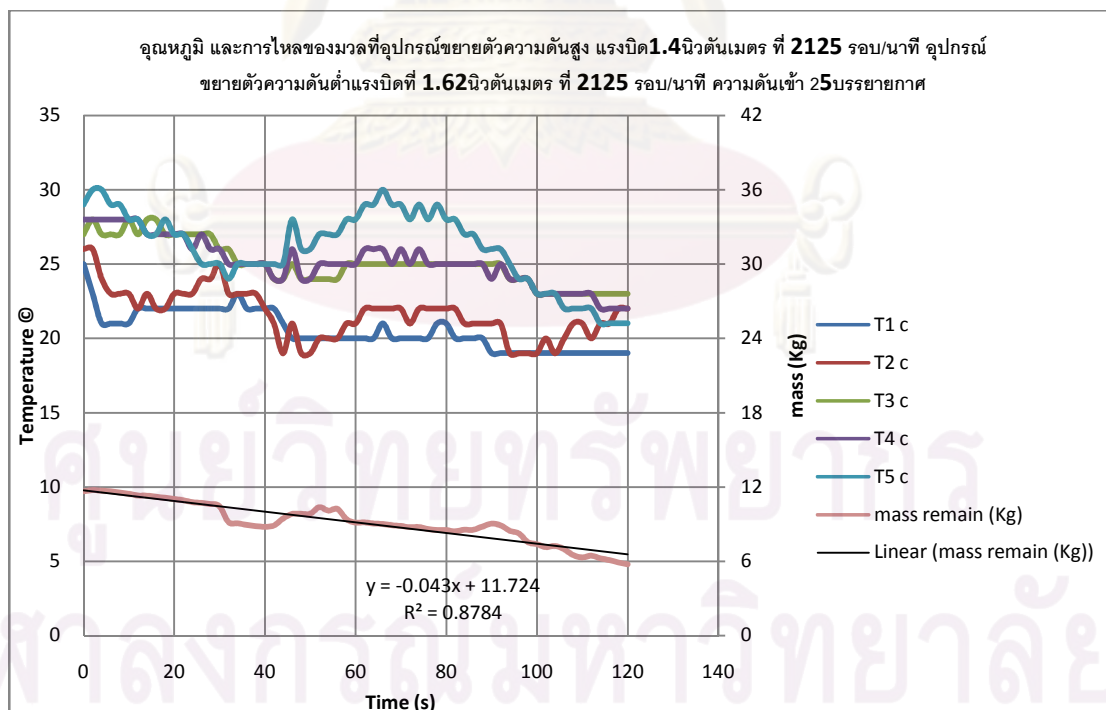
รูปที่ ค.17 อุณหภูมิ และการไหลของมวลที่อุปกรณ์ขยายตัวความดันสูง แรงบิด1 นิวตันเมตร ที่ 2750 รอบ/นาที อุปกรณ์ขยายตัวความดันต่ำแรงบิดที่ 0.73นิวตันเมตร ที่ 2500 รอบ/นาที ความดันเข้า 25บรรยากาศ



รูปที่ ค.18 อุณหภูมิ และการไหลของมวลที่อุปกรณ์ขยายตัวความดันสูง แรงบิด1นิวตันเมตร ที่ 2500รอบ/นาที อุปกรณ์ขยายตัวความดันต่ำแรงบิดที่ 0.81นิวตันเมตร ที่ 2375รอบ/นาที ความดันเข้า 25บรรยากาศ

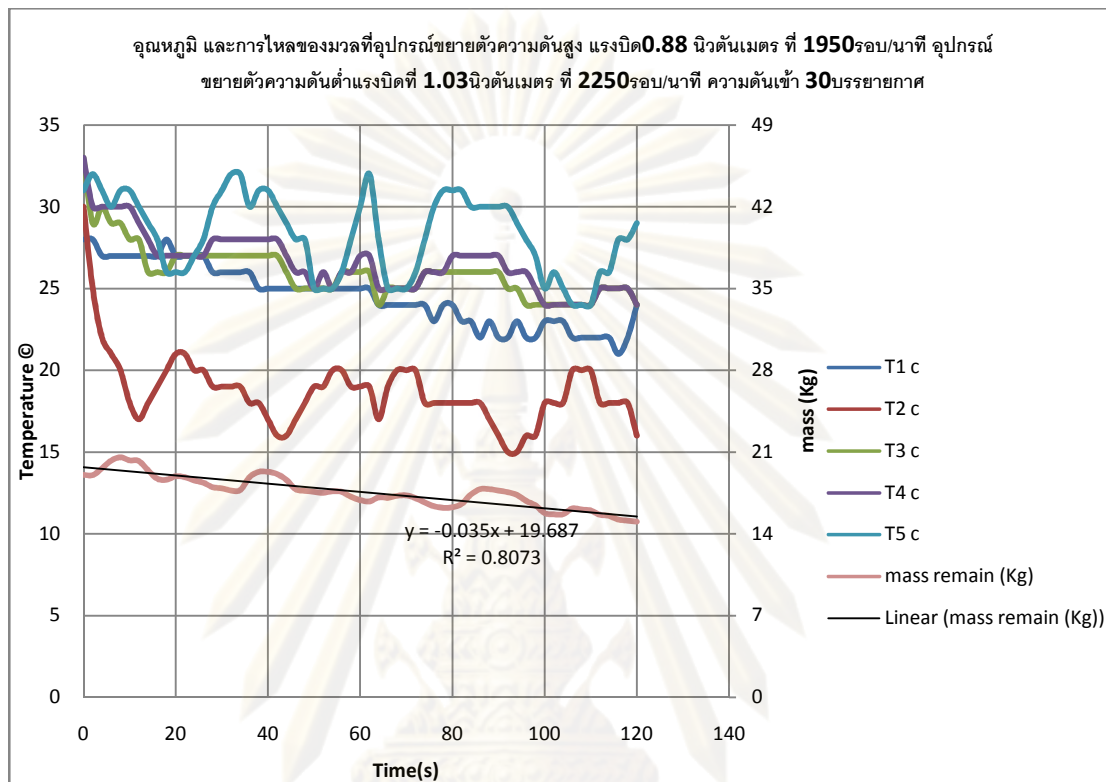


รูปที่ ค.19 อุณหภูมิ และการไหลของมวลที่อุปกรณ์ขยายตัวความดันสูง แรงบิด**1.4**นิวตันเมตร ที่ 2250 รอบ/นาที อุปกรณ์ขยายตัวความดันต่ำแรงบิดที่ **1.47**นิวตันเมตร ที่ **2200** รอบ/นาที ความดันเข้า 25บรรยากาศ

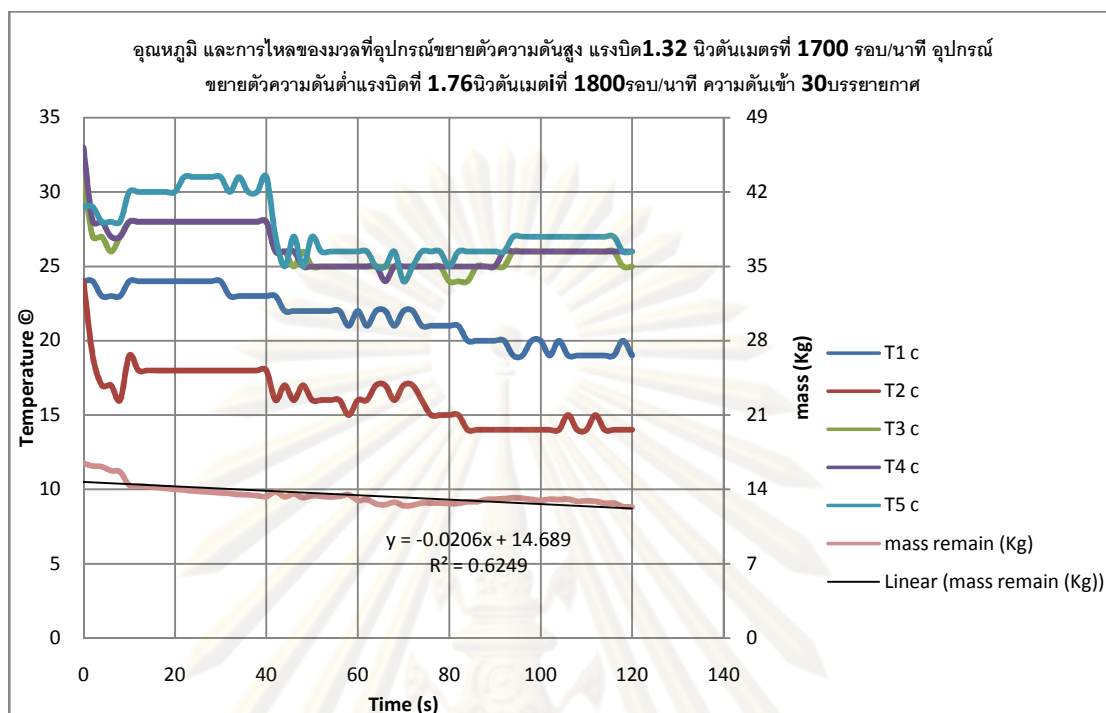


รูปที่ ค.20 อุณหภูมิ และการไหลของมวลที่อุปกรณ์ขยายตัวความดันสูง แรงบิด**1.4**นิวตันเมตร ที่ 2125 รอบ/นาที อุปกรณ์ขยายตัวความดันต่ำแรงบิดที่ **1.62**นิวตันเมตร ที่ **2125** รอบ/นาที ความดันเข้า 25บรรยากาศ

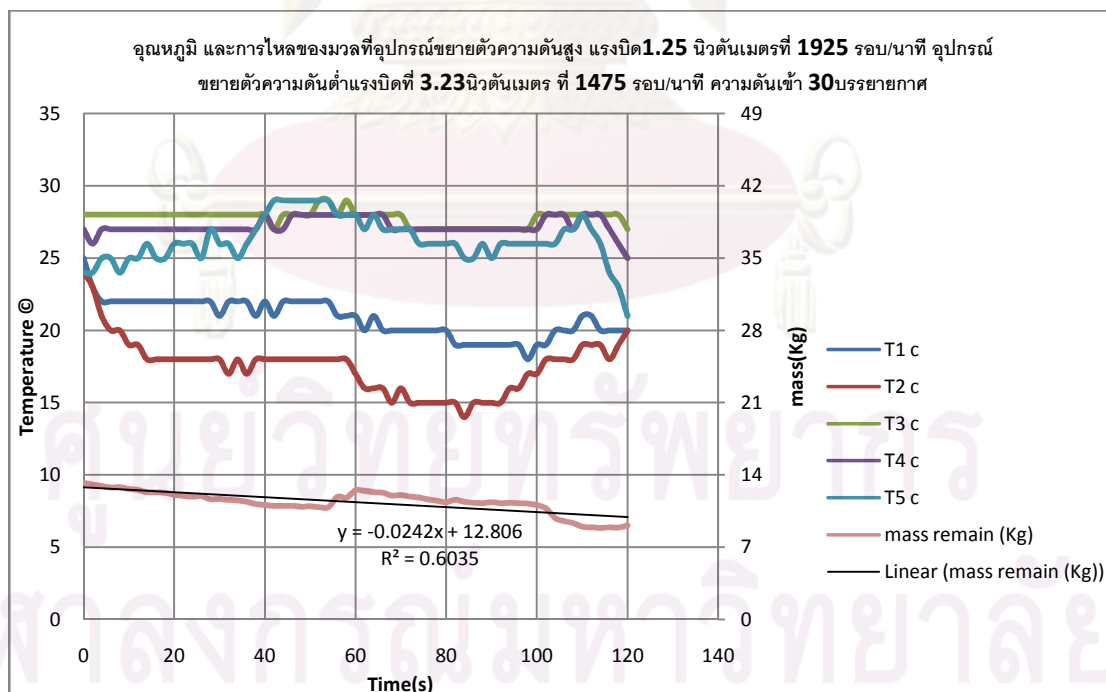
**ค.1.3 อุณหภูมิที่จุดต่างๆและการลดลงของมวลภายในถังความดันของระบบเครื่องยนต์
เมื่อ ความดันก่อนเข้าระบบ คือ 3 MPa (30 บรรยากาศ)**



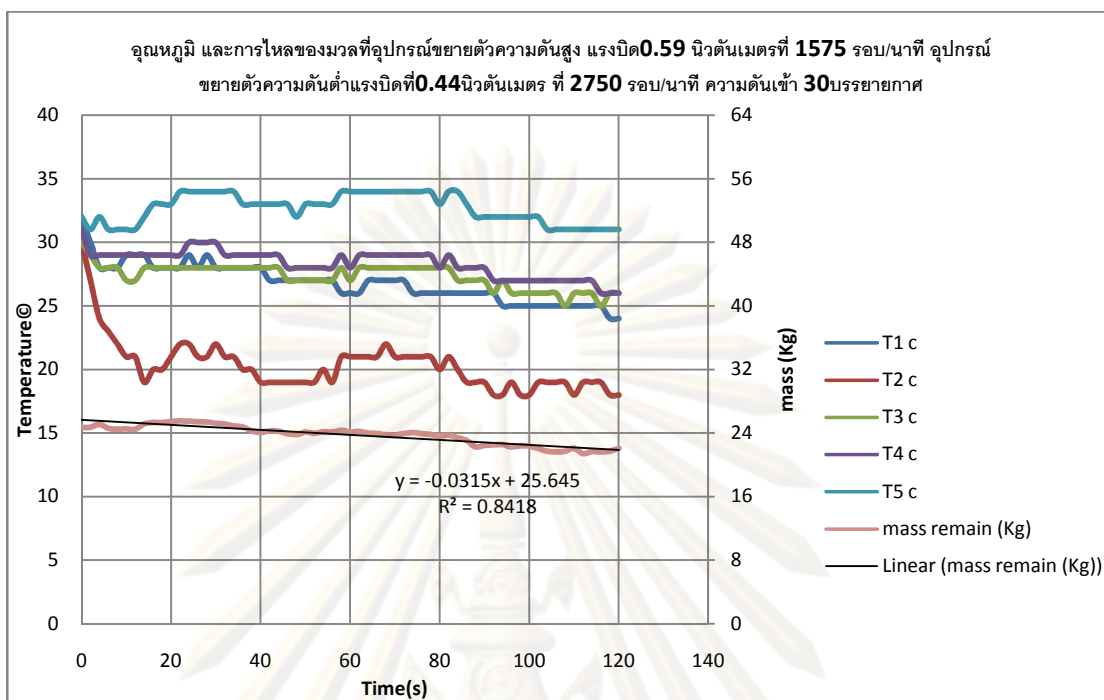
รูปที่ ค.21 อุณหภูมิ และการไหลของมวลที่อุปกรณ์ขยายตัวความดันสูง แรงบิด0.88 นิวตันเมตร ที่ 1950รอบ/นาที อุปกรณ์ขยายตัวความดันต่ำแรงบิดที่ 1.03นิวตันเมตร ที่ 2250รอบ/นาที ความดันเข้า 30บรรยากาศ



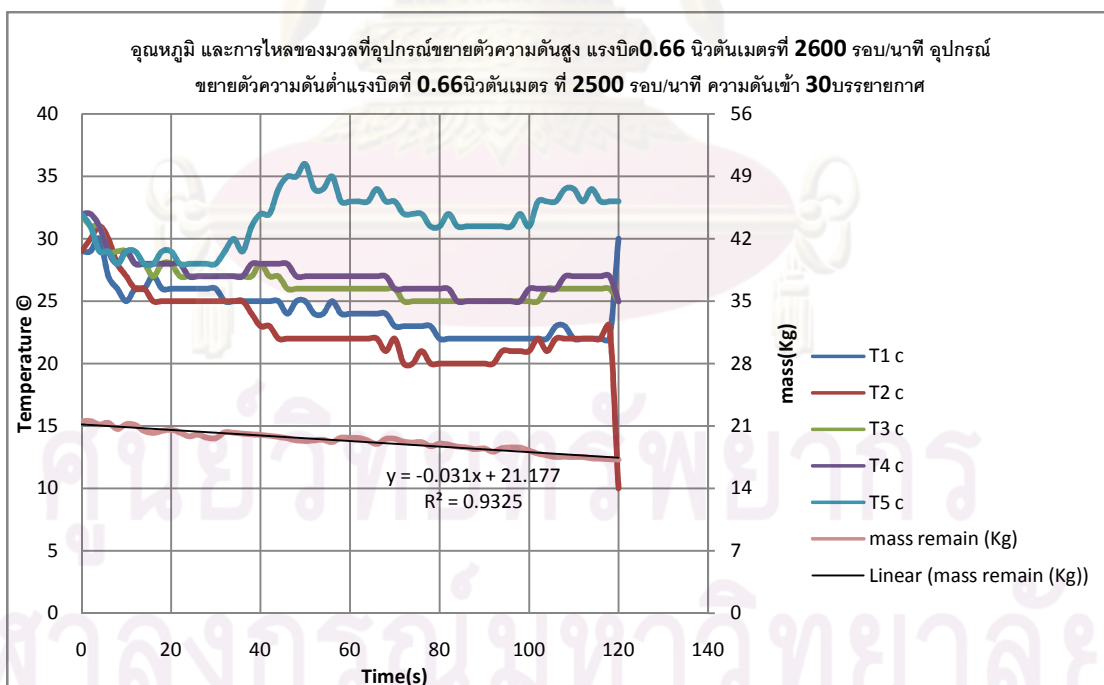
รูปที่ ค.22 อุณหภูมิ และการไหลของมวลที่อุปกรณ์ขยายตัวความดันสูง แรงบิด**1.32** นิวตันเมตรที่ **1700** รอบ/นาที อุปกรณ์ขยายตัวความดันต่ำแรงบิดที่ **1.76**นิวตันเมตรที่ **1800**รอบ/นาที ความดันเข้า **30**บรรยากาศ



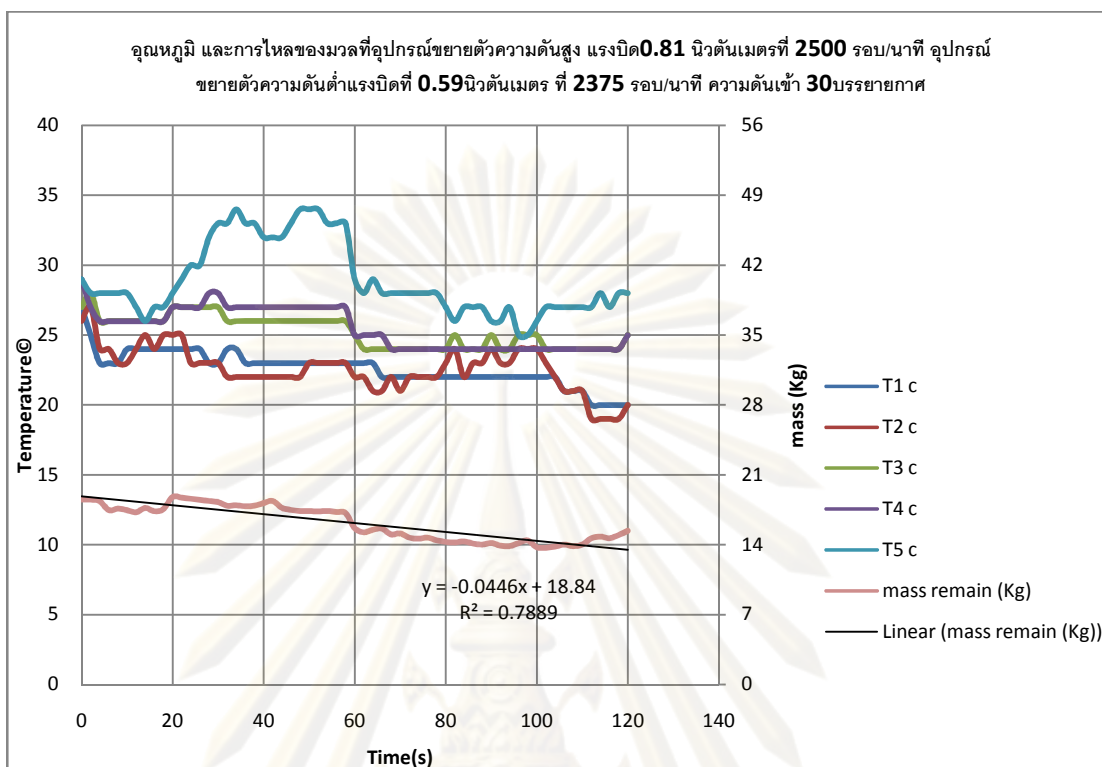
รูปที่ ค.23 อุณหภูมิ และการไหลของมวลที่อุปกรณ์ขยายตัวความดันสูง แรงบิด**1.25** นิวตันเมตรที่ **1925** รอบ/นาที อุปกรณ์ขยายตัวความดันต่ำแรงบิดที่ **3.23**นิวตันเมตร ที่ **1475** รอบ/นาที ความดันเข้า **30**บรรยากาศ



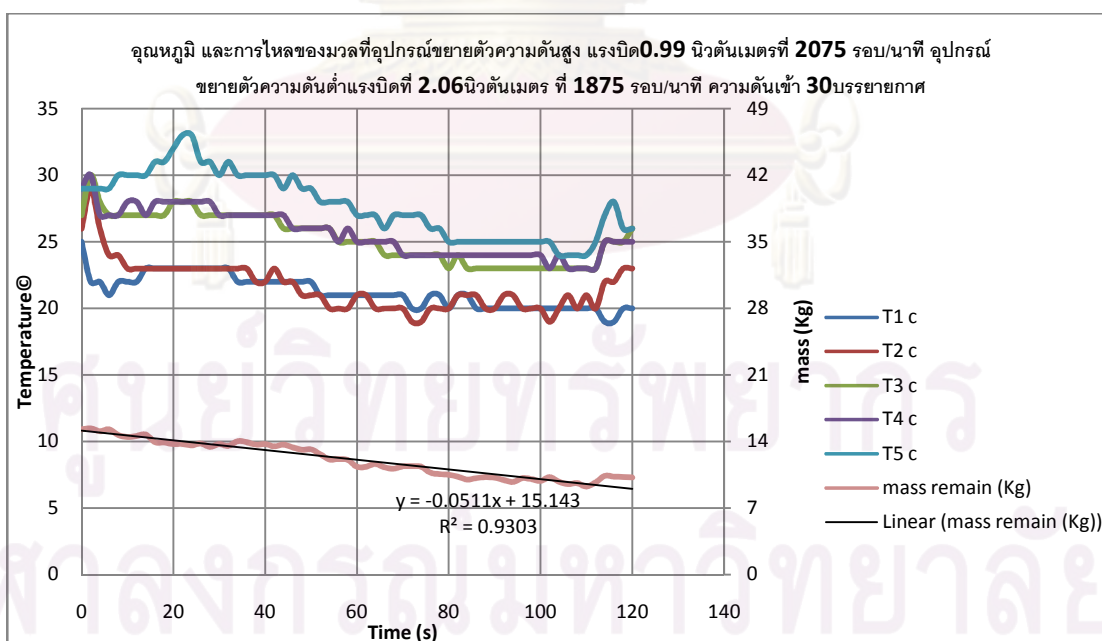
รูปที่ ค.24 อุณหภูมิ และการไหลของมวลที่อุปกรณ์ขยายตัวความดันสูง แรงบิด**0.59** นิวตันเมตรที่ **1575** รอบ/นาที อุปกรณ์ขยายตัวความดันต่ำแรงบิดที่**0.44**นิวตันเมตร ที่ **2750** รอบ/นาที ความดันเข้า **30**บรรยากาศ



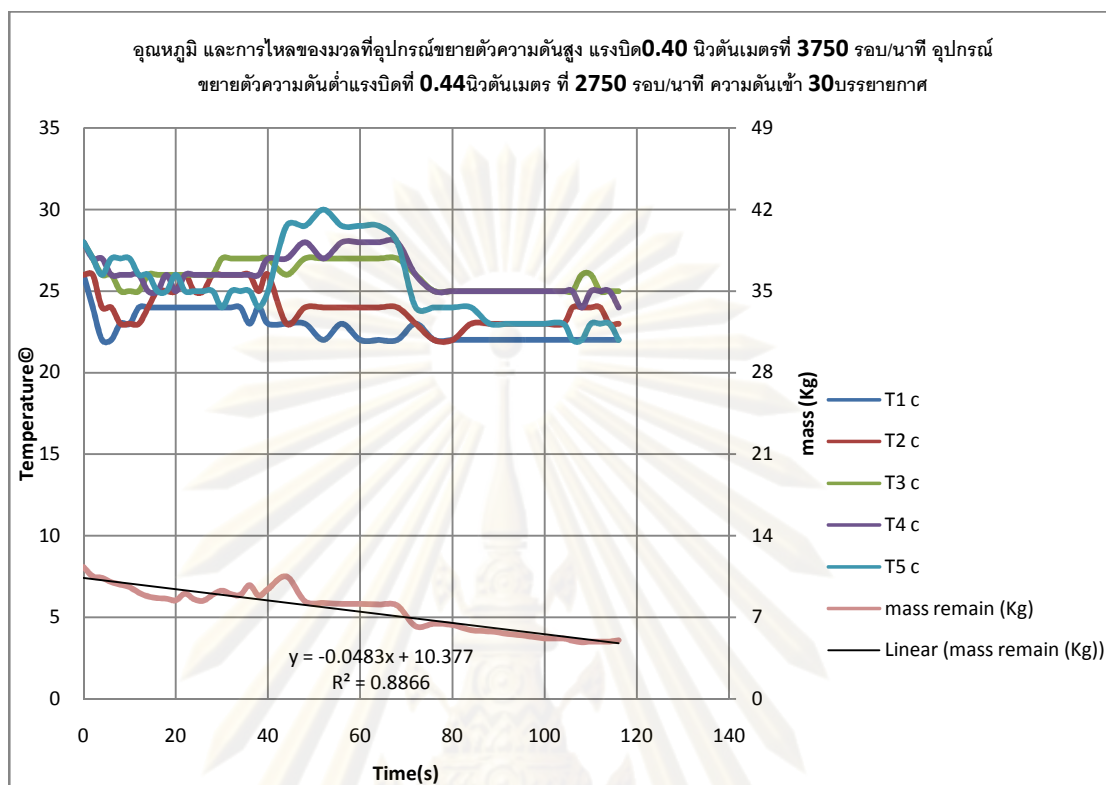
รูปที่ ค.25 อุณหภูมิ และการไหลของมวลที่อุปกรณ์ขยายตัวความดันสูง แรงบิด**0.66** นิวตันเมตรที่ **2600** รอบ/นาที อุปกรณ์ขยายตัวความดันต่ำแรงบิดที่ **0.66**นิวตันเมตร ที่ **2500** รอบ/นาที ความดันเข้า **30**บรรยากาศ



รูปที่ ค.26 อุณหภูมิ และการไหลของมวลที่อุปกรณ์ขยายตัวความดันสูง แรงบิด**0.81** นิวตันเมตรที่ **2500** รอบ/นาที อุปกรณ์ขยายตัวความดันต่ำแรงบิดที่ **0.59**นิวตันเมตร ที่ **2375** รอบ/นาที ความดันเข้า **30**บรรยากาศ



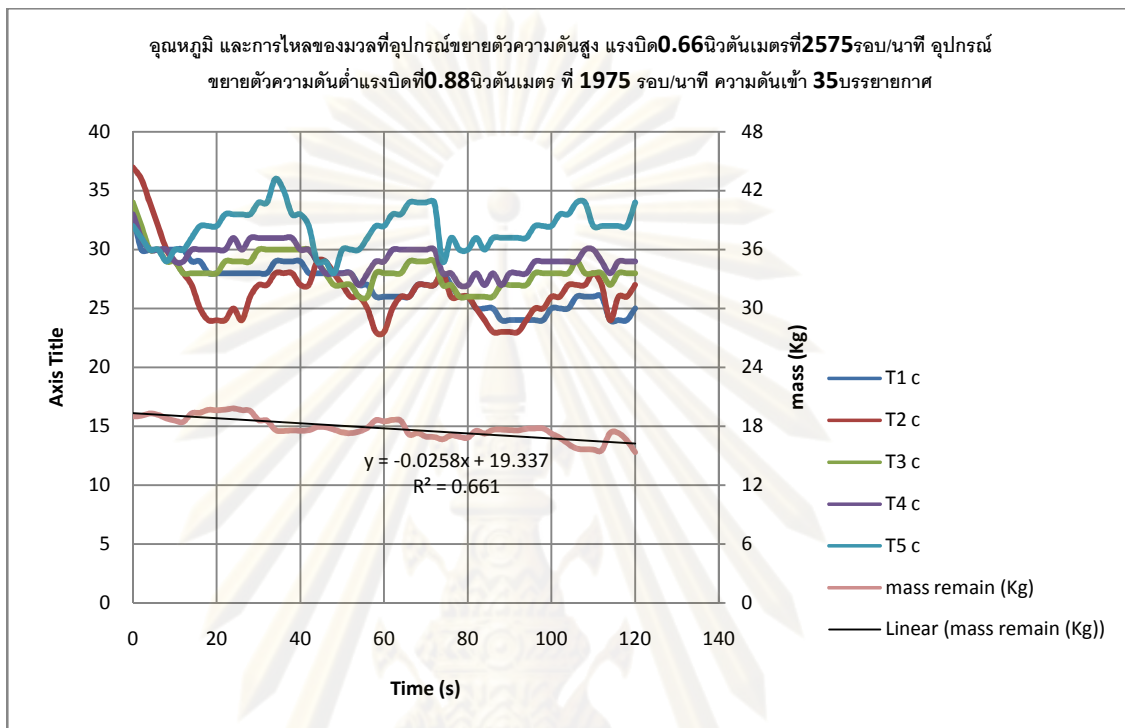
รูปที่ ค.27 อุณหภูมิ และการไหลของมวลที่อุปกรณ์ขยายตัวความดันสูง แรงบิด**0.99** นิวตันเมตรที่ **2075** รอบ/นาที อุปกรณ์ขยายตัวความดันต่ำแรงบิดที่ **2.06**นิวตันเมตร ที่ **1875** รอบ/นาที ความดันเข้า **30**บรรยากาศ



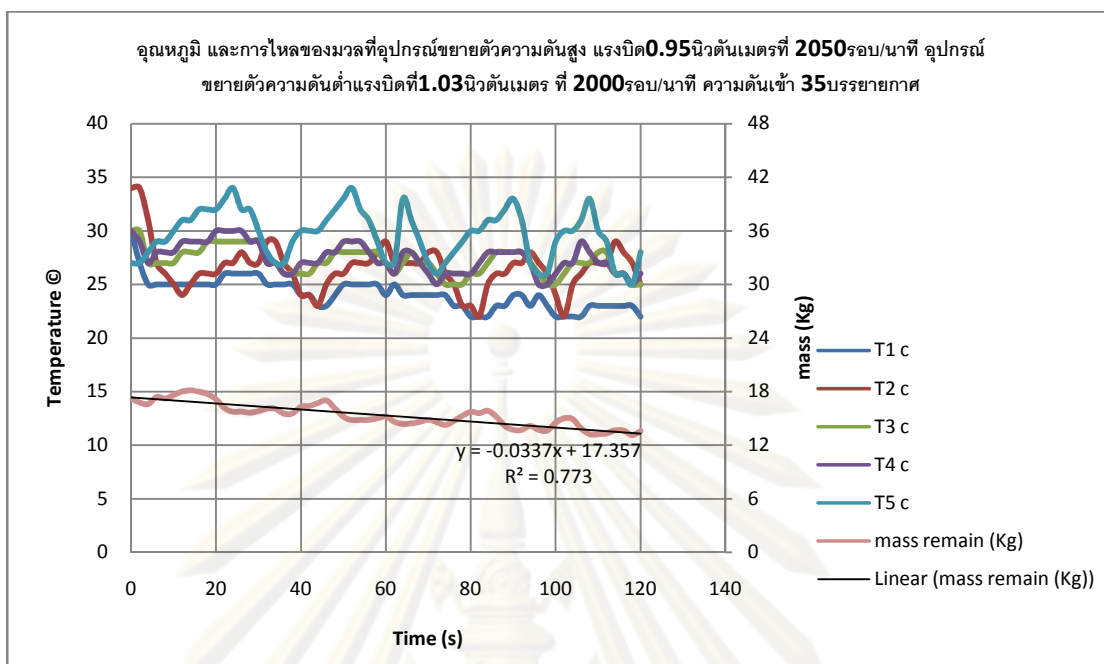
รูปที่ ค.28 อุณหภูมิ และการไหลของมวลที่อุปกรณ์ขยายตัวความดันสูง แรงบิด**0.40** นิวตันเมตรที่ **3750** รอบ/นาที อุปกรณ์ขยายตัวความดันต่ำแรงบิดที่ **0.44**นิวตันเมตร ที่ **2750** รอบ/นาที ความดันเข้า **30**บรรยากาศ

ศูนย์วิทยทรัพยากร
 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

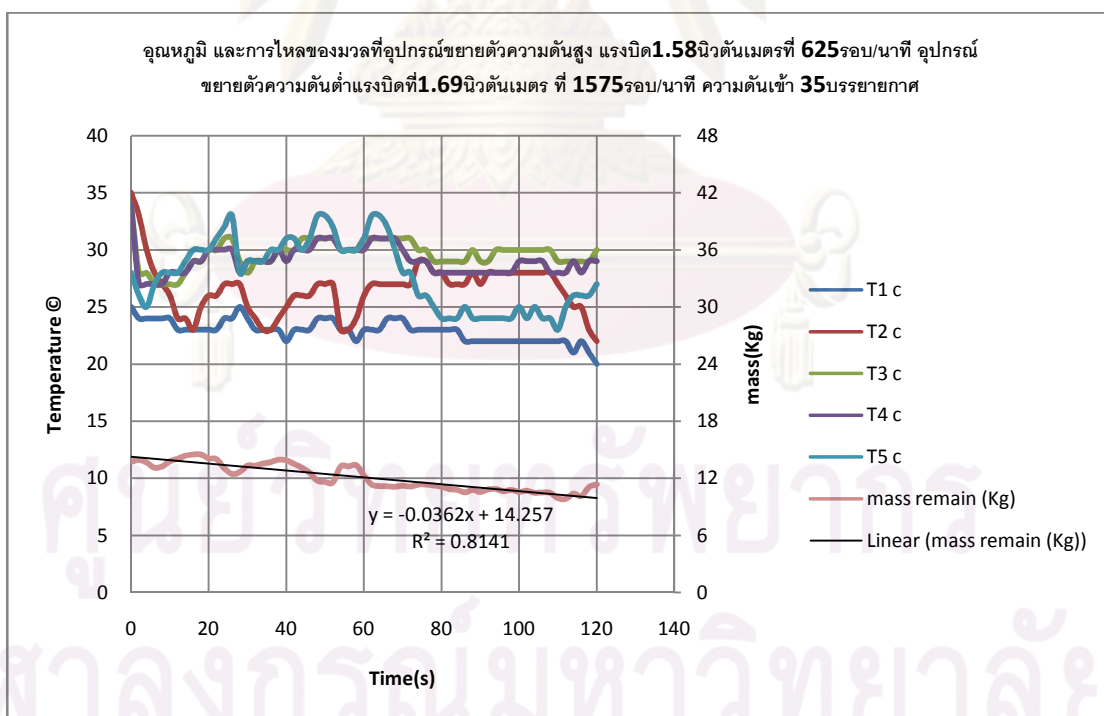
**ค.1.4 อุณหภูมิที่จุดต่างๆและการลดลงของมวลภายในถึงความดันของระบบเครื่องยนต์
เมื่อ ความดันก่อนเข้าระบบ คือ 3.5 MPa (35 บรรยากาศ)**



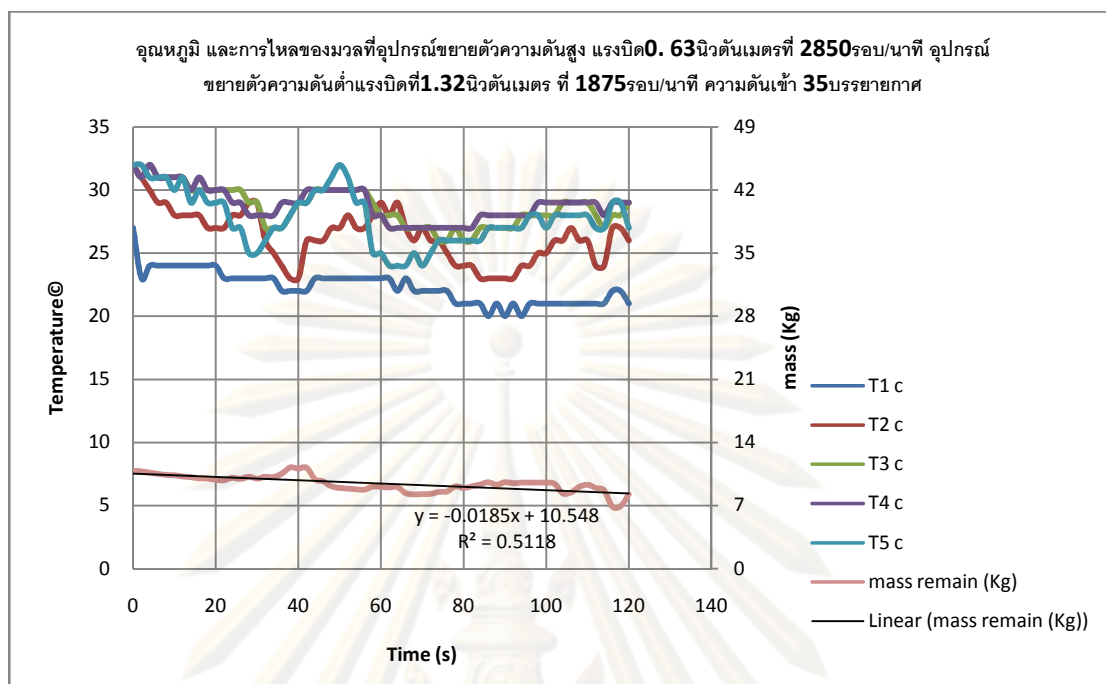
รูปที่ ค.29 อุณหภูมิ และการไหลของมวลที่อุปกรณ์ขยายตัวความดันสูง แรงบิด0.66นิวตันเมตรที่ 2575รอบ/นาที อุปกรณ์ขยายตัวความดันต่ำแรงบิดที่0.88นิวตันเมตร ที่ 1975 รอบ/นาที ความดันเข้า 35บรรยากาศ



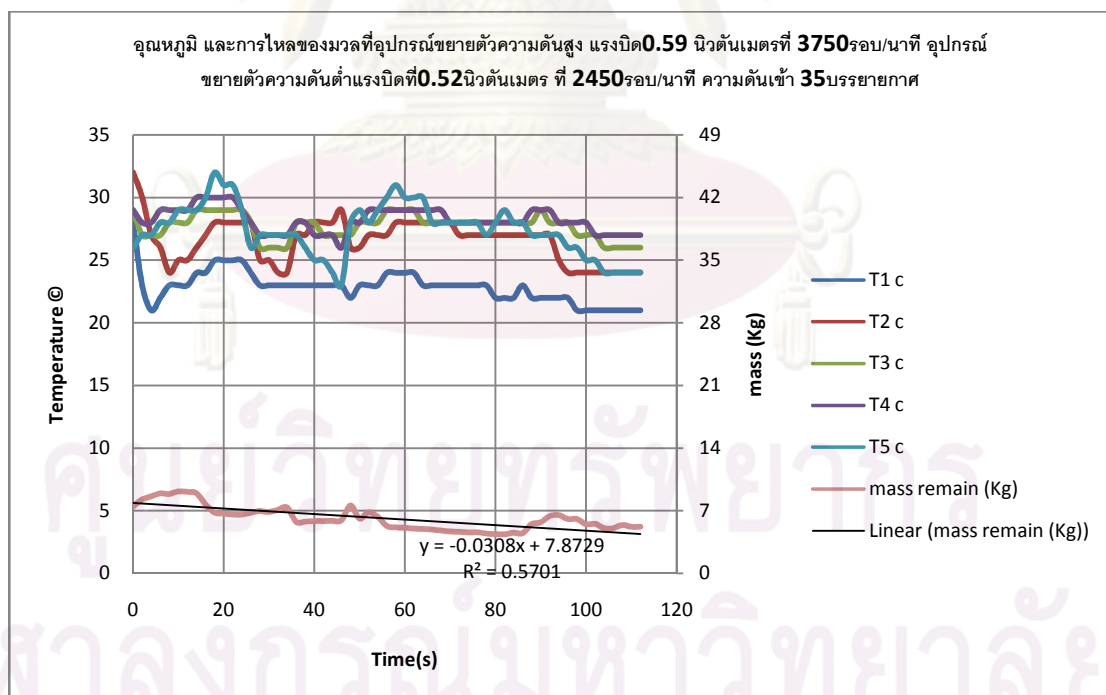
รูปที่ ค.30 อุณหภูมิ และการไหลของมวลที่อุปกรณ์ขยายตัวความดันสูง แรงบิด**0.95**นิวตันเมตรที่ **2050**รอบ/นาที อุปกรณ์ขยายตัวความดันต่ำแรงบิดที่**1.03**นิวตันเมตร ที่ **2000**รอบ/นาที ความดันเข้า **35**บรรยากาศ



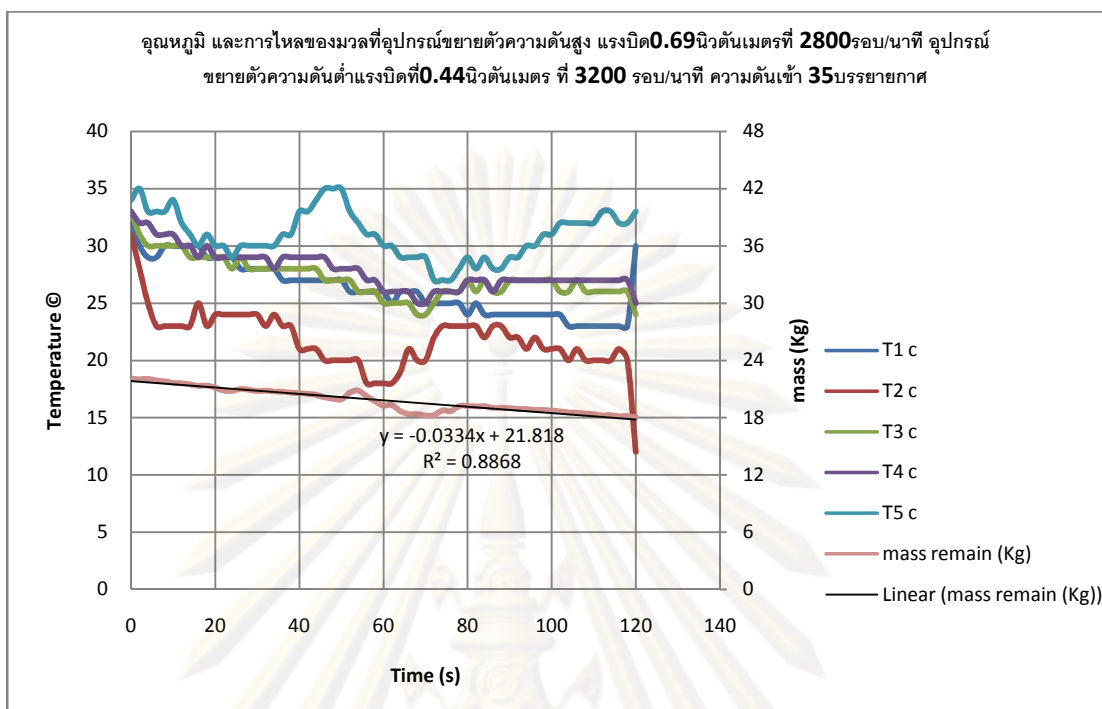
รูปที่ ค.31 อุณหภูมิ และการไหลของมวลที่อุปกรณ์ขยายตัวความดันสูง แรงบิด**1.58**นิวตันเมตรที่ **625**รอบ/นาที อุปกรณ์ขยายตัวความดันต่ำแรงบิดที่**1.69**นิวตันเมตร ที่ **1575**รอบ/นาที ความดันเข้า **35**บรรยากาศ



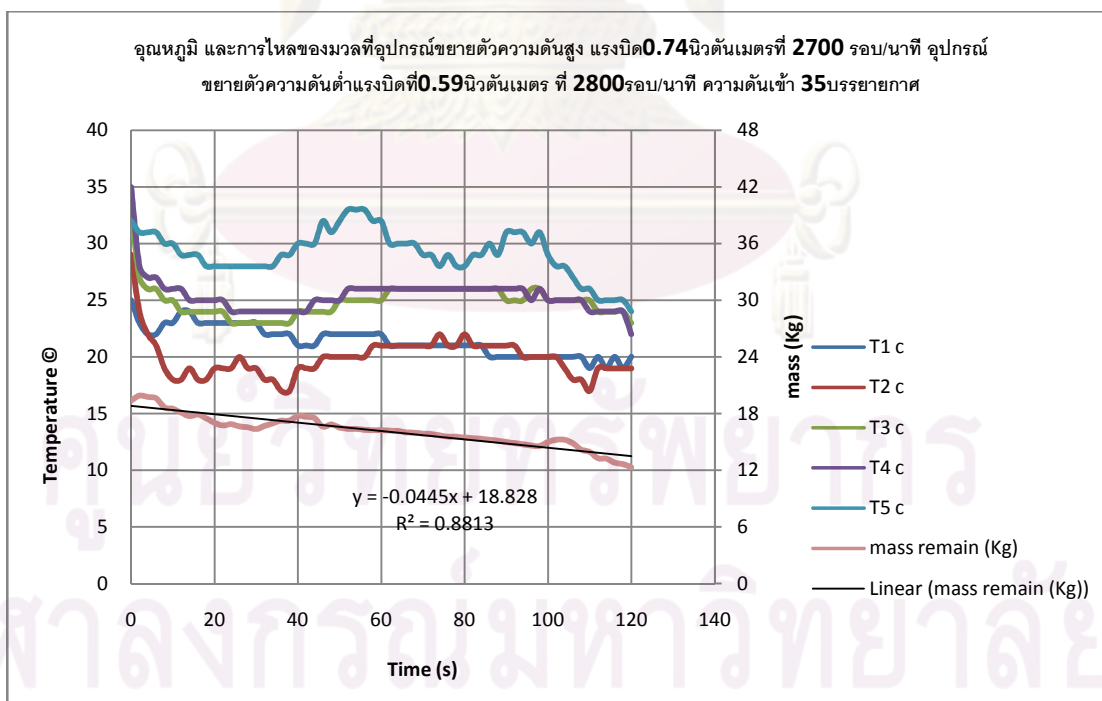
รูปที่ ค.32 อุณหภูมิ และการไหลของมวลที่อุปกรณ์ขยายตัวความดันสูง แรงบิด**0.63**นิวตันเมตรที่ **2850**รอบ/นาที อุปกรณ์ขยายตัวความดันต่ำแรงบิดที่**1.32**นิวตันเมตร ที่ **1875**รอบ/นาที ความดันเข้า **35**บรรยากาศ



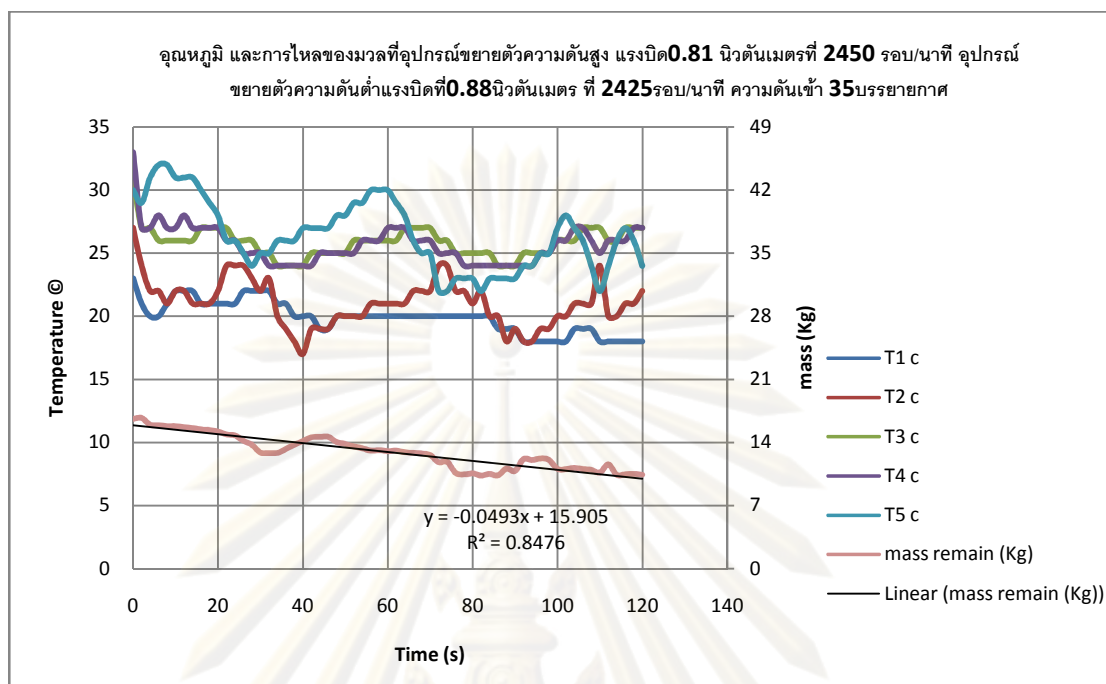
รูปที่ ค.33 อุณหภูมิ และการไหลของมวลที่อุปกรณ์ขยายตัวความดันสูง แรงบิด**0.59** นิวตันเมตรที่ **3750**รอบ/นาที อุปกรณ์ขยายตัวความดันต่ำแรงบิดที่**0.52**นิวตันเมตร ที่ **2450**รอบ/นาที ความดันเข้า **35**บรรยากาศ



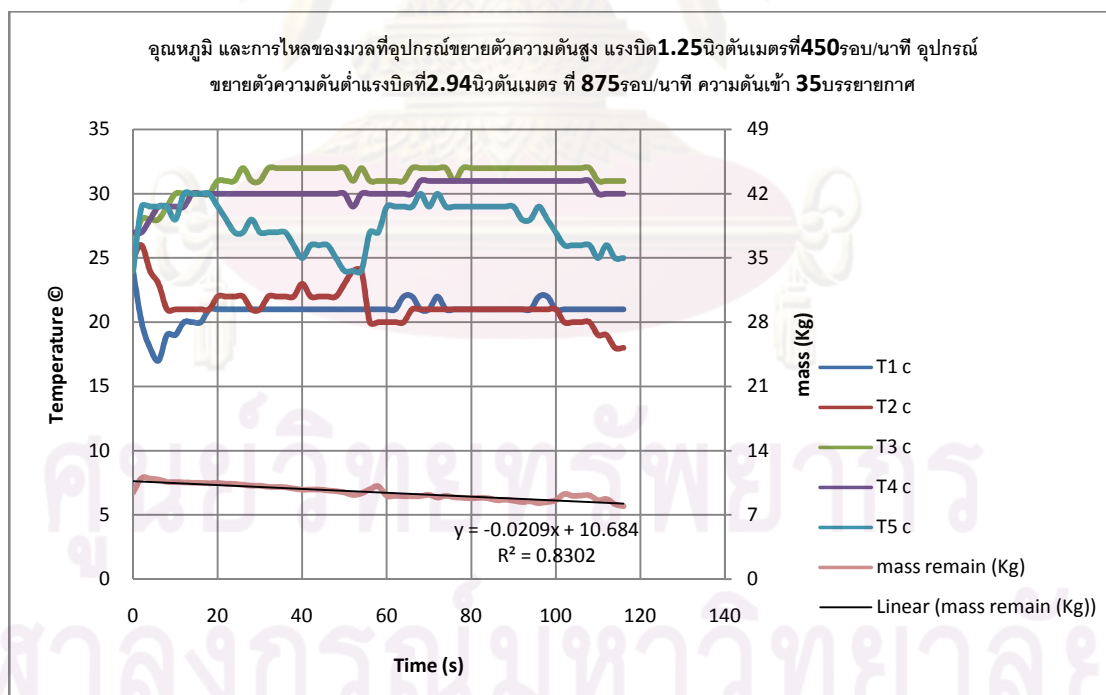
รูปที่ ค.34 อุณหภูมิ และการไหลของมวลที่อุปกรณ์ขยายตัวความดันสูง แรงบิด**0.69**นิวตันเมตรที่ 2800รอบ/นาที อุปกรณ์ขยายตัวความดันต่ำแรงบิดที่**0.44**นิวตันเมตร ที่ 3200 รอบ/นาที ความดันเข้า 35บรรยากาศ



รูปที่ ค.35 อุณหภูมิ และการไหลของมวลที่อุปกรณ์ขยายตัวความดันสูง แรงบิด**0.74**นิวตันเมตรที่ 2700 รอบ/นาที อุปกรณ์ขยายตัวความดันต่ำแรงบิดที่**0.59**นิวตันเมตร ที่ 2800รอบ/นาที ความดันเข้า 35บรรยากาศ



รูปที่ ค.36 อุณหภูมิ และการไหลของมวลที่อุปกรณ์ขยายตัวความดันสูง แรงบิด**0.81** นิวตันเมตรที่ **2450** รอบ/นาที อุปกรณ์ขยายตัวความดันต่ำแรงบิดที่**0.88**นิวตันเมตร ที่ **2425**รอบ/นาที ความดันเข้า **35**บรรยากาศ



รูปที่ ค.36 อุณหภูมิ และการไหลของมวลที่อุปกรณ์ขยายตัวความดันสูง แรงบิด**0.81** นิวตันเมตรที่ **2450** รอบ/นาที อุปกรณ์ขยายตัวความดันต่ำแรงบิดที่**0.88**นิวตันเมตร ที่ **2425**รอบ/นาที ความดันเข้า **35**บรรยากาศ

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายภูพิงค์ แต่ปีติกุล เกิดเมื่อวันที่ 22 ธันวาคม พ.ศ. 2525 ที่กรุงเทพมหานคร สำเร็จ การศึกษาระดับปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะ วิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2547 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตร วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์ มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2548



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย