

การศึกษาเชิงทดลองของแบริ่งเฟลาถนชนิดไม่เต็มวงที่มีความยืดหยุ่น
Experimental Investigation of Soft Partial Journal Bearing



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของงานวิทยานิพนธ์ที่จัดทำขึ้นเพื่อใช้ในการศึกษาวิจัย
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2555

การศึกษาเชิงทดลองของแบริ่งเพลากลมชนิดไม่เต็มวงที่มีความยืดหยุ่น
EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF SOFT PARTIAL JOURNAL BEARING

วีระยุทธ แดนชัยภูมิ
สิริพงษ์ ดาวเจริญพร
สุนิตศา ศรีวันเพ็ญ

อาจารย์ที่ปรึกษา
รศ.ดร มงคล มงคลวงศ์โรจน์

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2555

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Experimental Investigation of Soft Partial Journal Bearing

WEERAYUT DANCHAIYAPOOM

SIRIPONG DAOCHAROENPORN

SUNITSA SRIWANBHEN

Assoc. Prof

DR.MONGKOL MONGKOLWONGROJH ADVISOR

A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
BACHELOR OF ENGINEERING IN MECHANICAL ENGINEERING
FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

2012

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญานิพนธ์ปีการศึกษา 2555

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การศึกษาเชิงทดลองของแบร็ริงเพลากลมชนิดไม่เต็มวงที่มีความยืดหยุ่น

EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF SOFT PARTIAL JOURNAL BEARING

ผู้จัดทำ

1. วีระยุทธ แดนชัยภูมิ รหัสประจำตัว 52011156
2. สิริพงษ์ ดาวเจริญพร รหัสประจำตัว 52011283
3. สุนิตศา ศรีวินเพ็ญ รหัสประจำตัว 52011322



(รศ.ดร มงคล มงคลวงศ์โรจน์)

อาจารย์ที่ปรึกษา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การศึกษาเชิงทดลองของแบร็งเพลากลมชนิดไม่เต็มวงที่มีความยืดหยุ่น

วีระยุทธ แดนชัยภูมิ 52011156

สิริพงษ์ ดาวเจริญพร 52011283

สุนิตศา ศรีวันเพ็ญ 52011322

รศ.ดร.มงคล มงคลวงศ์โรจน์ อาจารย์ที่ปรึกษา
ปีการศึกษา 2555

บทคัดย่อ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ได้นำเสนอ การศึกษาเชิงทดลองแบร็งเพลากลมชนิดไม่เต็มวง โดยพิจารณาผลของ อุณหภูมิ ความดันและความหนาฟิล์ม ภายใต้ชนิดของสารหล่อลื่น ชนิด ของไหล นิวโตเนียน SAE-40 และ SOFT MATERIAL โดยใช้ อุปกรณ์แปลงสัญญาณแรงดันในการวัดความดันฟิล์ม ใช้ GAP SENSOR ในการวัดความหนาฟิล์มและใช้ เทอร์โมคัปเปอ์ ในการวัดอุณหภูมิที่ได้จากการบันทึกผลการทดลองมาวิเคราะห์เปรียบเทียบกับผลการคำนวณเชิงตัวเลขทางทฤษฎี โดยใช้ สมการโมดิฟายเรโนลด์ วิเคราะห์ผลทางทฤษฎีเกี่ยวกับความหนาของฟิล์มและความดัน และใช้ สมการพลังงานมาวิเคราะห์ผลทางทฤษฎีเกี่ยวกับอุณหภูมิ จากผลการทดลองพบว่า SOFT MATERIAL ที่ภาระสูง จะมีผลต่อพฤติกรรมของแบร็งเพลากลม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF SOFT PARTIAL JOURNAL BEARING

WEERAYUT	DANCHAIYAPOOM	52011156
SIRIPONG	DAOCHAROENPORN	52011283
SUNITSA	SRIWANBHEN	52011322

Assoc. Prof DR.MONGKOL MONGKOLWONGROJH ADVISOR
Year 2012

ABSTRACT

This thesis presented experimental investigation of soft partial journal bearing. Modify Reynolds equations and adiabatic energy equations are formulated to obtain the characteristics of journal bearing numerically. The numerical results are film pressure distribution, film temperature distribution and film thickness profile with Newtonian fluid SAE-40 and soft material. Bearing test rig will be set up to be able to measure film pressure, film temperature and film thickness using pressure transducers, thermocouples and gap sensors. The experimental results are compared with the numerical results. In this study, the influence of soft material is significant.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้อย่างสมบูรณ์ โดยได้รับความกรุณาอย่างสูงจาก รองศาสตราจารย์ ดร.มงคล มงคลวงศ์โรจน์ อาจารย์ที่ปรึกษา ซึ่งได้ให้คำปรึกษา ตรวจสอบ ให้คำแนะนำ และให้ความช่วยเหลือในหลายสิ่งหลายอย่าง ไม่ว่าจะเป็นเรื่องการแก้ไขปัญหา ข้อบกพร่องต่างๆ การให้ความดูแลเอาใจใส่ตั้งแต่เริ่มต้นจนกระทั่งลุล่วงไปได้ด้วยดี และขอขอบพระคุณท่านอาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกลทุกท่านที่คอยให้ความห่วงใย ติดตาม สอบถาม ดูแลเอาใจใส่และให้กำลังใจเสมอมา

สุดท้ายนี้ขอขอบพระคุณบุคคลสำคัญที่สุดที่ทำให้ข้าพเจ้ามีวันนี้คือ บิดา มารดา อันเป็นที่เคารพรักยิ่ง ซึ่งได้เลี้ยงดูผู้เขียนมาอย่างดี พร้อมทั้งให้โอกาสในการศึกษาอย่างเต็มที่ และยังให้กำลังใจ เอาใจใส่ในทุกๆด้านอันหาที่เปรียบไม่ได้ ข้าพเจ้าขอระลึกในพระคุณอันสุดประมาณ และขอขอบพระคุณมา ณ ที่นี้

วิรัช แดนชัยภูมิ
สิริพงษ์ ดาวเจริญพร
สุนิตศา ศรีวันเพ็ญ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	V
สารบัญรูป.....	VI
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	1
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	1
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	2
1.5 ขั้นตอนของการศึกษา.....	2
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	3
2.1 สมการความหนาฟิล์ม.....	3
2.2 สมการเรโนลด์.....	4
2.3 สมการพลังงาน.....	13
2.4 สารหล่อลื่น.....	16
2.5 การคำนวณพฤติกรรมสถิตย์.....	20
บทที่ 3 การทดลอง.....	21
3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์ในการทดลอง.....	21
3.2 วิธีการทดลอง.....	32
3.3 ขั้นตอนการทดลอง.....	36
บทที่ 4 ผลการทดลอง.....	37
4.1 ผลการทดลอง.....	37
4.2 วิจารณ์ผลการทดลอง.....	50
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ.....	51
เอกสารอ้างอิง.....	52
ภาคผนวก ก.....	54
ภาคผนวก ข.....	59

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่

หน้า

4.1 แสดงการแทนค่าที่สภาวะต่างๆของการทดลองด้วยอัตราส่วนความเยื้องศูนย์กลาง.....	37
--	----



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2-1 แสดงความหนาฟิล์มของสารหล่อลื่นในกาบรองลื่น.....	3
2-2 แสดงการไหลของสารหล่อลื่นระหว่างแผ่นระนาบ.....	4
2-3 แสดงการที่กระทำต่อสารหล่อลื่นตามแนวแกน X.....	5
2-4 แสดงพื้นผิวของกาบรองแบร็งที่นำมาทางออก.....	12
2-5 แสดงแบบของผลต่างจำกัดสำหรับกาบรองลื่นเพลากลม.....	12
2-6 แสดงการสมดุลพลังงานที่ปริมาตรควบคุมการไหล.....	13
2-7 แสดงการนำความร้อนบนพื้นผิวที่มีความชัน.....	15
2-8 แสดงการเปลี่ยนรูปของสารหล่อลื่นนิวโทเนียนเมื่อถูกแรงเฉือน F.....	17
2-9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือน (T) และอัตราการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง $\frac{d\epsilon}{dt}$ ของสาร หล่อลื่นนิวโทเนียน.....	18
2-10 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือนกับอัตราการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของสารหล่อลื่นชนิด ต่างๆ.....	19
2-11 แสดงค่าความหนืดที่อุณหภูมิต่างๆ.....	19
2-12 แสดงแผนผังลำดับการหาการกระจายของความดันแบบไร้มิติ.....	20
3.1 ไดอะแกรมแสดงเครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง.....	21
3-2 มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับ 3 เฟส แบบอินดักชัน.....	22
3-3 พู่เล่ขนาดต่างๆ ที่ใช้ในการทดลอง.....	23
3-4 เพลที่ใช้ในการทดลอง.....	23
3-5 แบร็งที่ใช้ในการทดลอง.....	24
3-6 น้ำหนักที่ใช้ในการทดลอง.....	25
3-7 ชุดวางน้ำหนักที่ใช้ในการทดลอง.....	25
3-8 น้ำมันที่ใช้ในการทดลอง (10W – 40).....	26
3-9 ภาชนะที่ใส่และควบคุมการไหลน้ำมันที่ใช้ในการทดลอง.....	26
3.10 ไมโครมิเตอร์ (MICROMETER).....	27
3-11 เครื่องสอบเทียบความดัน (PRESSURE CALIBRATOR).....	28
3-12 เทอร์โมมิเตอร์ (THERMOMETER).....	28
3-13 ตัวแปลงสัญญาณความดัน (PRESSURE TRANSDUCER).....	29
3-14 เทอร์โมคัปเปิล (THERMOCOUPLE).....	29
3.15 อุปกรณ์วัดความหนาฟิล์ม (GAP SENSOR).....	30
3-16 โวลมิเตอร์ (VOLT METER).....	31
3-17 ตัวต้านทาน (RESISTANCE).....	31
3-18 ตัวจ่ายไฟ (POWER SUPPLY).....	32
3-19 แสดงวงจรสำหรับตัวแปลงสัญญาณความดัน (PRESSURE TRANSDUCER).....	33

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
3-20 แสดงการคาริเบตตัวแปลงสัญญาณความดัน (PRESSURE TRANSDUCER).....	33
3-21 แสดงวงจรสำหรับอุปกรณ์วัดความหนาฟิล์ม (GAP SENSOR).....	34
3-22 แสดงการคาริเบตอุปกรณ์วัดความหนาฟิล์ม (GAP SENSOR).....	34
3-23 แสดงวงจรสำหรับเทอร์โมคัปเปิล (THERMOCOUPLE).....	35
3-24 แสดงการคาริเบตเทอร์โมคัปเปิล (THERMOCOUPLE).....	35
3-25 แสดงการเปลี่ยนความเร็วรอบ.....	36
4-1 กราฟการกระจายแรงดัน แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ความดันในหน่วยไร้มิติและมุมของแบริ่งที่ความเร็วรอบ 95รอบต่อนาที และภาระ 10กิโลกรัม (อัตราส่วนความเยื้องศูนย์กลาง=0.407).....	38
4-2 กราฟการกระจายแรงดัน แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ความดันในหน่วยไร้มิติและมุมของแบริ่งที่ความเร็วรอบ 95รอบต่อนาที และภาระ 20กิโลกรัม (อัตราส่วนความเยื้องศูนย์กลาง=0.558).....	38
4-3 กราฟการกระจายแรงดัน แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ความดันในหน่วยไร้มิติและมุมของแบริ่งที่ความเร็วรอบ 95รอบต่อนาที และภาระ 30กิโลกรัม (อัตราส่วนความเยื้องศูนย์กลาง=0.633).....	39
4-4 กราฟการกระจายแรงดัน แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ความดันในหน่วยไร้มิติและมุมของแบริ่งที่ความเร็วรอบ 95รอบต่อนาที และภาระ 40กิโลกรัม (อัตราส่วนความเยื้องศูนย์กลาง=0.68).....	39
4-5 กราฟการกระจายแรงดัน แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ความดันในหน่วยไร้มิติและมุมของแบริ่งที่ความเร็วรอบ 222รอบต่อนาที และภาระ 10กิโลกรัม (อัตราส่วนความเยื้องศูนย์กลาง=0.226).....	40
4-6 กราฟการกระจายแรงดัน แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ความดันในหน่วยไร้มิติและมุมของแบริ่งที่ความเร็วรอบ 222รอบต่อนาที และภาระ 20กิโลกรัม (อัตราส่วนความเยื้องศูนย์กลาง=0.372).....	40
4-7 กราฟการกระจายแรงดัน แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ความดันในหน่วยไร้มิติและมุมของแบริ่งที่ความเร็วรอบ 222รอบต่อนาที และภาระ 30กิโลกรัม (อัตราส่วนความเยื้องศูนย์กลาง=0.464).....	41
4-8 กราฟการกระจายแรงดัน แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ความดันในหน่วยไร้มิติและมุมของแบริ่งที่ความเร็วรอบ 222รอบต่อนาที และภาระ 40กิโลกรัม (อัตราส่วนความเยื้องศูนย์กลาง=0.526).....	41
4-9 กราฟการกระจายแรงดัน แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ความดันในหน่วยไร้มิติและมุมของแบริ่งที่ความเร็วรอบ 507รอบต่อนาที และภาระ 10กิโลกรัม (อัตราส่วนความเยื้องศูนย์กลาง=0.107).....	42
4-10 กราฟการกระจายแรงดัน แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ความดันในหน่วยไร้มิติและมุมของแบริ่งที่ความเร็วรอบ 507รอบต่อนาที และภาระ 20กิโลกรัม (อัตราส่วนความเยื้องศูนย์กลาง=0.202).....	42
4-11 กราฟการกระจายแรงดัน แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ความดันในหน่วยไร้มิติและมุมของแบริ่งที่ความเร็วรอบ 507รอบต่อนาที และภาระ 30กิโลกรัม (อัตราส่วนความเยื้องศูนย์กลาง=0.279).....	43
4-12 กราฟการกระจายแรงดัน แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ความดันในหน่วยไร้มิติและมุมของแบริ่งที่ความเร็วรอบ 507รอบต่อนาที และภาระ 40กิโลกรัม (อัตราส่วนความเยื้องศูนย์กลาง=0.342).....	43
4-13 กราฟการกระจายอุณหภูมิ แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง อุณหภูมิในเคลวินและมุมของแบริ่งที่ความเร็วรอบ 95รอบต่อนาที และภาระ 10กิโลกรัม (อัตราส่วนความเยื้องศูนย์กลาง=0.407).....	44
4-14 กราฟการกระจายอุณหภูมิ แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง อุณหภูมิในเคลวินและมุมของแบริ่งที่ความเร็วรอบ 95รอบต่อนาที และภาระ 20กิโลกรัม (อัตราส่วนความเยื้องศูนย์กลาง=0.558).....	44

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4-15 กราฟการกระจายอุณหภูมิ แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง อุณหภูมิในเคลวินและมุมของแบร์ริงที่ความเร็วรอบ 95รอบต่อนาที และภาระ 30กิโลกรัม (อัตราส่วนความเยื้องศูนย์กลาง=0.633).....	45
4-16 กราฟการกระจายอุณหภูมิ แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง อุณหภูมิในเคลวินและมุมของแบร์ริงที่ความเร็วรอบ 95รอบต่อนาที และภาระ 40กิโลกรัม (อัตราส่วนความเยื้องศูนย์กลาง=0.68).....	45
4-17 กราฟการกระจายอุณหภูมิ แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง อุณหภูมิในเคลวินและมุมของแบร์ริงที่ความเร็วรอบ 222รอบต่อนาที และภาระ 10กิโลกรัม (อัตราส่วนความเยื้องศูนย์กลาง=0.226).....	46
4-18 กราฟการกระจายอุณหภูมิ แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง อุณหภูมิในเคลวินและมุมของแบร์ริงที่ความเร็วรอบ 222รอบต่อนาที และภาระ 20กิโลกรัม (อัตราส่วนความเยื้องศูนย์กลาง=0.372).....	46
4-19 กราฟการกระจายอุณหภูมิ แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง อุณหภูมิในเคลวินและมุมของแบร์ริงที่ความเร็วรอบ 222รอบต่อนาที และภาระ 30กิโลกรัม (อัตราส่วนความเยื้องศูนย์กลาง=0.464).....	47
4-20 กราฟการกระจายอุณหภูมิ แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง อุณหภูมิในเคลวินและมุมของแบร์ริงที่ความเร็วรอบ 222รอบต่อนาที และภาระ 40กิโลกรัม (อัตราส่วนความเยื้องศูนย์กลาง=0.526).....	47
4-21 กราฟการกระจายอุณหภูมิ แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง อุณหภูมิในเคลวินและมุมของแบร์ริงที่ความเร็วรอบ 507รอบต่อนาที และภาระ 10กิโลกรัม (อัตราส่วนความเยื้องศูนย์กลาง=0.107).....	48
4-22 กราฟการกระจายอุณหภูมิ แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง อุณหภูมิในเคลวินและมุมของแบร์ริงที่ความเร็วรอบ 507รอบต่อนาที และภาระ 20กิโลกรัม (อัตราส่วนความเยื้องศูนย์กลาง=0.202).....	48
4-23 กราฟการกระจายอุณหภูมิ แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง อุณหภูมิในเคลวินและมุมของแบร์ริงที่ความเร็วรอบ 507รอบต่อนาที และภาระ 30กิโลกรัม (อัตราส่วนความเยื้องศูนย์กลาง=0.279).....	49
4-24 กราฟการกระจายอุณหภูมิ แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง อุณหภูมิในเคลวินและมุมของแบร์ริงที่ความเร็วรอบ 507รอบต่อนาที และภาระ 40กิโลกรัม (อัตราส่วนความเยื้องศูนย์กลาง=0.342).....	49

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

จากเหตุผลที่อุตสาหกรรมมีการขยายตัวอย่างต่อเนื่อง ดังนั้นจึงจำเป็นต้องพัฒนาเครื่องจักรให้มีประสิทธิภาพในการทำงานและอายุการใช้งานที่ยาวนานขึ้น แต่ในการทำงานของเครื่องจักรจำเป็นต้องมีการเสียดสี เพื่อป้องกันการสึกหรอจึงจำเป็นต้องให้เกิดฟิล์มระหว่างชิ้นงานที่เสียดสีกัน เพื่อลดความเสียหายจากการเสียดสีและสามารถรับภาระหนักได้ตลอดจนช่วยลดอุณหภูมิเนื่องจากแรงเสียดทาน ซึ่งการสร้างฟิล์มของสารหล่อลื่นจำเป็นต้องมีการใช้กาบรองลื่น ซึ่งเป็นชิ้นส่วนที่ใช้รองรับเพลาดำพวกแบริ่งชนิดต่างๆ

จากอดีตถึงปัจจุบันมีการคิดค้นชนิดและรูปร่างของกาบรองลื่นเพลากลมออกเป็นหลายชนิด อาทิเช่น มีรูปร่างไม่เป็นวงกลม อาจมีรูปร่างเหมือนรูปกลมมน กาบรองลื่นรูปวงรี กาบรองลื่น 3 โลบ และ 4 โลบ หรือบางครั้งกาบรองลื่นมีลักษณะเป็นส่วนโค้งของวงกลมบางส่วนเท่านั้นคือ ไม่เป็นวงกลม ซึ่งข้อดีของกาบรองลื่นชนิดไม่เต็มวงกลมคือ ช่วยลดการสูญเสียพลังงาน เนื่องจากความฝืด และกาบรองลื่นยังสามารถรับภาระได้สูงใกล้เคียงกับกาบรองลื่นชนิดเต็มวง

จากการศึกษาทางวิจัย “ การศึกษาสมรรถนะการหล่อลื่นด้วยน้ำมันพืชของแบริ่งเพลากลม ” มีการศึกษาพฤติกรรมการกระจายแรงดันบนแบริ่งเพลากลมโดยการเปรียบเทียบผลการคำนวณและผลการทดลองพบว่าสามารถทำนายพฤติกรรมสามารถทำนายพฤติกรรมการกระจายแรงดันบนแบริ่งเพลากลมได้อย่างถูกต้อง และ จากการศึกษาผลของความหนืดพบว่าความหนืดจะเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิ , อุณหภูมิก็เปลี่ยนแปลงตามการกระจายแรงดัน และ การกระจายแรงดันก็เปลี่ยนแปลงตามความหนืดเช่นกัน ดังนั้นจึงได้ทำการศึกษาการเขียนสมการพลังงานจาก “ *Adiabatic Approximate Solution for Static and Dynamic Characteristics of Turbulent Partial Journal Bearing with Surface Roughness* ”

ในปริญญาโทฉบับนี้ เป็นการศึกษาเชิงทดลองแบริ่งเพลากลม ชนิดไม่เต็มวง ซึ่งจะศึกษาผลของแรงดันกับความหนาแน่นฟิล์มและอุณหภูมิที่เกิดขึ้น เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความหนาของ Soft material โดยใช้ชนิดของสารหล่อลื่นชนิด ของไหลนิวโตเนียน SAE-40 และ Soft Material ทั้งในทางทฤษฎีและบันทึกผล แล้วนำผลที่ได้มาวิเคราะห์เปรียบเทียบกับทฤษฎี

1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา

- 1 ศึกษาพฤติกรรมของแบริ่งเพลากลม ชนิดไม่เต็มวง ตามทฤษฎีโดยวิธีการคำนวณเชิงตัวเลข
- 2 ศึกษาเชิงทดลองหาพฤติกรรมของแบริ่งเพลากลมที่มีความยืดหยุ่น
- 3 เปรียบเทียบผลการคำนวณและผลการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.3 ขอบเขตการวิจัย

- 1 ศึกษาการเขียนสมการโมติฟายเรโนลด์ สำหรับ ของไหลนอนนิวทอนเนียน

- 2 ศึกษาการเขียนสมการความหนาของฟิล์มของกาบรองลีน
- 3 ศึกษาการเขียนสมการพลังงานสำหรับ ของไหลนิวโทเนียน
- 4 ศึกษาโปรแกรมฟอร์แทรน เพื่อใช้ในการหาผลเฉลยทางทฤษฎี
- 5 ทำการสร้างและติดตั้งอุปกรณ์ในการทดลอง , วัดการกระจายแรงดัน , อุณหภูมิ และ ความหนาฟิล์ม
- 6 ทำการบันทึกผลการทดลองและนำผลที่ได้มาวิเคราะห์เปรียบเทียบกับผลทางทฤษฎีตามสมการข้างต้นที่ได้ทำการศึกษา

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1 ได้รับความรู้ในการใช้สารหล่อลื่น และหน้าที่ของสารหล่อลื่น ซึ่งหัวข้อที่ศึกษาเป็นปัจจัยเพียงหนึ่งในหลายอย่างของสารหล่อลื่นเท่านั้น
- 2 นำผลการวิจัยเพื่อเป็นแนวทางในการปรับปรุงแก้ไข เพื่อใช้ในโรงงานอุตสาหกรรม หรือเป็นแนวทางในการทำวิจัยต่อไป
- 3 การสร้างชุดทดลองเพื่อการทดลอง สามารถทดลองสารหล่อลื่นหลายๆชนิดนอกเหนือจากการทดลองได้

1.5 ขั้นตอนของการศึกษา

- 1 กำหนด “การศึกษาเชิงทดลอง ของแบริงเพลากลมชนิดไม่เต็มวง” เป็นชื่อหัวข้อ ปริญญาโท
- 2 ศึกษาปริญญาโทที่มีความเกี่ยวข้องกับหัวข้อที่ต้องการศึกษา
- 3 ทำการศึกษาสมการนาเวียร์-สโตกส์และกฎทรงมวลและความหนืดสัมบูรณ์ ซึ่งเป็นพื้นฐานในการคำนวณทางทฤษฎี
- 4 กำหนดขอบเขตการศึกษา
- 5 กำหนดกรอบแนวคิดโดยใช้สมการโมดิฟายเรโนลด์ในการอธิบายผลของแรงดันและความหนาฟิล์ม ใช้สมการพลังงานอธิบายผลของการกระจายอุณหภูมิ
- 6 ศึกษาทฤษฎีที่ต้องใช้ตามกรอบแนวคิด
- 7 ออกแบบการทดลองและเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง
- 8 ทำการทดลองและบันทึกผลการทดลอง
- 9 วิเคราะห์ผลการทดลองแล้วนำไปเปรียบเทียบกับผลทางทฤษฎี
- 10 อภิปรายผลและนำเสนอผลที่ได้จากการศึกษาและจากการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องในการหาพฤติกรรมสติกของสารหล่อลื่น

การศึกษาพฤติกรรมของสารหล่อลื่นสำหรับกาบรองลื่นจะต้องหาลักษณะทางเรขาคณิตของแบร็งเพลากลม และจะสามารถอธิบายผลของการกระจายแรงดันด้วยสมการเรโนลด์ เนื่องจากการกระจายแรงนั้นส่งผลให้เห็นว่าสารหล่อลื่นได้รับภาระเนื่องจากน้ำหนักอยู่ ดังนั้นจึงอธิบายผลของอุณหภูมิด้วยสมการพลังงาน และจากผลของอุณหภูมิทำให้ความหนืดของสารหล่อลื่นมีค่าเปลี่ยนไป ดังนั้นจึงทำการหาความสัมพันธ์ของค่าความหนืดกับอุณหภูมิ เพื่อเพิ่มความแม่นยำในการทำนายพฤติกรรมสติกของสารหล่อลื่น

2.1 สมการความหนาฟิล์ม

รูปที่ 2-1 แสดงความหนาฟิล์มของสารหล่อลื่นในกาบรองลื่น

จากรูปที่ 2-1 สามารถหาลักษณะทางเรขาคณิตของแบร็งเพลากลมได้ โดย h คือ ความหนาฟิล์มของสารหล่อลื่น

$$\begin{aligned} h &= EF \\ &= OB - (CE - CD) \\ &= R_1 - (R_2 - e \cos \theta) \\ &= R_1 - R_2 + e \cos \theta \\ &= C + e \cos \theta \\ &= C(1 + \varepsilon \cos \theta) \end{aligned} \tag{2.1}$$

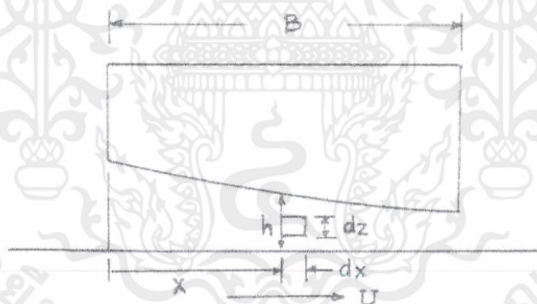
เมื่อ ε คือ อัตราเยื้องศูนย์ ($\varepsilon = \frac{e}{C}$) ซึ่งงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2 สมการเรโนลด์

2.2.1 สมการเรโนลด์ทั่วไป

ข้อสมมติฐานในการเขียนสมการเรโนลด์

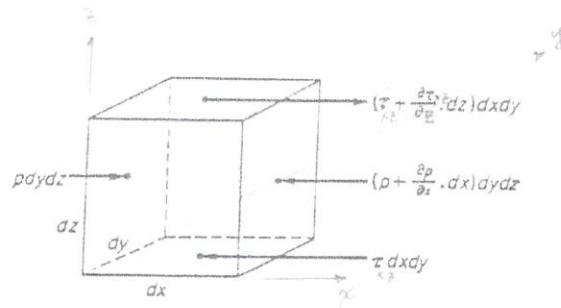
- 1 ไม่คิดแรงภายนอกที่กระทำกับสารหล่อลื่น เช่นไม่คิดแรงเนื่องจากน้ำหนักของสารหล่อลื่น แรงแม่เหล็กไฟฟ้า
- 2 ความดันที่เกิดขึ้นในสารหล่อลื่นจะไม่เปลี่ยนแปลงไปตามแกนความหนาของของไหล ซึ่งหมายความว่าฟิล์มของสารหล่อลื่นนั้นบางมาก
- 3 การไหลของสารหล่อลื่นในกาบร่องลื่นที่มีผิวโค้งนั้นถูกสมมติว่าเป็นการไหลในแกนตรงไม่คิดผลเนื่องจากผิวโค้งของกาบร่องลื่น
- 4 ไม่คิดการสั่นไหลของสารหล่อลื่นในกาบร่องลื่น ดังนั้นสารหล่อลื่นที่แตะจับผิวกาบร่องลื่นหรือเพลากลมจะมีความเร็วเท่ากับผิวกาบร่องลื่นหรือผิวเพลลา
- 5 สารหล่อลื่นมีคุณสมบัติเป็นของไหลนิวโทเนียน (Newtonian fluid)
- 6 การไหลของสารหล่อลื่นเป็นการไหลอย่างเป็นระเบียบ (Laminar flow)
- 7 ไม่คิดแรงเฉื่อยของสารหล่อลื่น เนื่องจากฟิล์มของสารหล่อลื่นบางมาก
- 8 ความหนืดของสารหล่อลื่นมีค่าคงที่ ไม่เปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิหรือความดันจากการสมดุลของแรงที่กระทำต่อสารหล่อลื่น



รูปที่ 2-2 แสดงการไหลของสารหล่อลื่นระหว่างแผ่นระนาบ

พิจารณางานสองชั้น ชั้นบนมีความเร็ว u ตามแกน x ชั้นล่างเป็นชั้นส่วนที่อยู่กับที่และมีสารหล่อลื่นคั่นระหว่างวัตถุทั้งสอง พิจารณาก่อนทรงปริมาตรของสารหล่อลื่นขนาด $dx dy dz$ โดยกำหนดให้พื้นผิวเป็นปริมาตรควบคุม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2-3 แสดงการที่กระทำต่อสารหล่อลื่นตามแนวแกน x

เมื่อพิจารณาการสมดุลแรงตามรูปที่ 2-3 พบว่าแรงกระทำต่อสารหล่อลื่นประกอบด้วยแรงเฉือนระหว่างชั้นของสารหล่อลื่นและแรงเนื่องจากความดันของสารหล่อลื่น ซึ่งความสามารถเขียนสมการสมดุลของแรงตามแกน x ได้ดังนี้

$$\left(p + \frac{\partial p}{\partial x} dx\right) dydz - P dydz + \tau_{xz} dx dy - \left(\tau_{xz} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} dz\right) dx dy = 0$$

ทำการจัดรูปสมการ

$$\frac{\partial p}{\partial x} dx dy dz + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} dx dy dz = 0$$

$$\left(\frac{\partial p}{\partial x} - \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z}\right) dx dy dz = 0$$

ดังนั้น

$$\frac{\partial p}{\partial x} = \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} \quad (2.2)$$

ในทำนองเดียวกันเมื่อพิจารณาตามแกน y จะได้

$$\frac{\partial p}{\partial y} = \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial z} \quad (2.3)$$

จากสมการความเค้นเฉือนของนิวตัน

$$\begin{aligned} \partial \tau_{xz} &= \mu \frac{\partial u}{\partial z} & \text{และ} & & \partial \tau_{yz} &= \mu \frac{\partial v}{\partial z} \\ \partial \tau_{xz} &= \mu \frac{\partial u}{\partial z} & \text{และ} & & \partial \tau_{yz} &= \mu \frac{\partial v}{\partial z} \end{aligned} \quad (2.4)$$

เมื่อ u และ v เป็นองค์ประกอบความเร็วในทิศทาง x และ y ตามลำดับ เอกสารจัดรูปสมการ (2.4) จะได้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} = \mu \frac{\partial^2 u}{\partial z^2}$$

และ

$$\frac{\partial \tau_{yz}}{\partial z} = \mu \frac{\partial^2 v}{\partial z^2}$$

เมื่อแทนค่าลงในสมการ (2.2) และ (2.3) จะได้

$$\frac{\partial^2 u}{\partial z^2} = \frac{1}{\mu} \frac{\partial P}{\partial x}$$

และ

$$\frac{\partial^2 v}{\partial z^2} = \frac{1}{\mu} \frac{\partial P}{\partial y} \quad (2.5)$$

อินทิเกรตสมการ (2.5) เทียบกับ z สองครั้งจะได้ผลเฉลยทั่วไปสำหรับการกระจายความเร็ว u และ v ดังนี้

$$\begin{aligned} u &= \frac{1}{2\mu} \frac{\partial P}{\partial x} z^2 + C_1 z + C_2 \\ v &= \frac{1}{2\mu} \frac{\partial P}{\partial y} z^2 + C_3 z + C_4 \end{aligned} \quad (2.6)$$

เมื่อ C_1, C_2, C_3 และ C_4 เป็นค่าคงที่สามารถหาได้ภายใต้เงื่อนไขขอบเขต (Boundary condition)

$$u = U \quad V = 0 \quad \text{ที่} \quad z = 0$$

$$u = 0 \quad , \quad V = 0 \quad \text{ที่} \quad z = h$$

ภายใต้เงื่อนไขขอบเขตจะสามารถหาค่า C_1, C_2, C_3 และ C_4 ได้ดังนี้

$$\begin{aligned} C_1 &= \frac{-h}{2\mu} \frac{\partial P}{\partial x} (z^2 - hz) + U \frac{(h-z)}{h} & C_2 &= U \\ C_3 &= \frac{-h}{2\mu} \frac{\partial P}{\partial y} & C_4 &= 0 \end{aligned}$$

แทนค่าคงที่ C_1, C_2, C_3 และ C_4 ลงในสมการ (2.6) จะได้องค์ประกอบความเร็ว u และ w ดังนี้

$$\begin{aligned} u &= \frac{1}{2\mu} \frac{\partial P}{\partial x} (z^2 - hz) + U \frac{(h-z)}{h} \\ w &= \frac{1}{2\mu} \frac{\partial P}{\partial z} (z^2 - hz) \end{aligned} \quad (2.7)$$

จากข้อสมมติฐานให้สารหล่อลื่นเป็นของไหลแบบอัดตัวไม่ได้ เมื่อพิจารณาที่ปริมาตรควบคุมอัตราการไหล (q) ที่ไหลเข้าปริมาตรควบคุมจะต้องเท่ากับอัตราการไหลที่ไหลออกจากปริมาตรควบคุม ซึ่งสามารถเขียนได้เป็น

$$udzdy + wdx dy + vdx dz$$

$$= \left(u + \frac{\partial u}{\partial x} dx \right) dzdy + \left(w + \frac{\partial w}{\partial z} dz \right) dx dy + \left(v + \frac{\partial v}{\partial y} dy \right) dx dz$$

จัดรูปสมการจะได้สมการความต่อเนื่องดังนี้

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial w}{\partial z} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (2.8)$$

เมื่อ u , v และ w คือความเร็วตามแกน x , y และ z ตามลำดับ

จากข้อสมมติฐานที่ไม่มีการไหลออกทางด้านข้างของกาบร่องสั่นจะได้

$$\frac{\partial v}{\partial y} = 0$$

จากสมการ (2.8)

$$\frac{\partial w}{\partial z} = -\frac{\partial u}{\partial x} \quad (2.9)$$

จากสมการ (2.7) ทำการ Differentiate ความเร็ว u จะได้

$$\frac{\partial u}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} \left[\frac{1}{2\mu} \frac{\partial p}{\partial x} (z-h)z + U \left(1 - \frac{z}{h} \right) \right]$$

แทนค่า ลงในสมการ (3.8) แล้วทำการอินทิเกรตตามแนวแกน z จากระยะที่ 0 ถึง h จะได้

$$\int_0^h \frac{\partial w}{\partial z} dz = - \int_0^h \frac{\partial}{\partial x} \left[\frac{\partial p}{\partial x} z \frac{(z-h)}{2\mu} \right] dy + \int_0^h \frac{\partial U}{\partial x} \left(1 - \frac{z}{h} \right) dz$$

$$w \Big|_0^h = - \frac{\partial}{\partial x} \left[\frac{\partial p}{\partial x} \left(\frac{z^2 - hz}{2\mu} \right) \right] \Big|_0^h + \frac{\partial}{\partial x} \left[U \left(z - \frac{z^2}{2h} \right) \right] \Big|_0^h$$

สมมติให้การเกาะติดของสารหล่อลื่นกับกาบร่องสั่นเป็นอย่างสมบูรณ์ จะได้ $v = 0$ ที่ $z = h$ จะได้

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(h^3 \frac{\partial p}{\partial x} \right) = 6\mu\eta \frac{\partial h}{\partial x} \quad (2.10)$$

จากสมการ (2.10) เป็นสมการเรโนลด์สำหรับการไหล 1 มิติ ในกรณีที่มีการไหลออกทางด้านข้างของกาบ

ร่องสั่น การวิเคราะห์การกระจายความดันจะใช้สมการเรโนลด์สำหรับการไหล 2 มิติ ซึ่งก็คือ

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(h^3 \frac{\partial p}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(h^3 \frac{\partial p}{\partial y} \right) = 6\mu\eta \frac{\partial h}{\partial x} \quad (2.11)$$

2.2.2 สมการโมติฟายเรโนลด์สำหรับของไหลนอน-นิวโตเนียน

ในการที่จะหาที่มาของสมการโมติฟายเรโนลด์สำหรับหาค่าพฤติกรรมสลิตคือ การกระจายความดันในฟิล์มของน้ำมันหล่อลื่นนั้นสามารถใช้ทฤษฎีของ L.K and H.G. Eirod เพื่อหา

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์ของสถาบันวิจัยและพัฒนาเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่าการตีพิมพ์หรือการนำเอกสารนี้ไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตจากสถาบันวิจัยและพัฒนา

จากการสมมูลแรงที่กระทำกับสารหล่อลื่นในปริมาตรควบคุมเราสามารถแสดงสมการการเปลี่ยนแปลงโมเมนตัมได้โดย

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\mu^* \frac{\partial u}{\partial z} \right) = \frac{\partial p}{\partial x} \quad , \quad \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu^* \frac{\partial w}{\partial z} \right) = \frac{\partial p}{\partial y} \quad (2.12)$$

เมื่อ μ^* คือ Apparent viscosity

$$\mu^* = \mu^*(I) \quad (2.13)$$

เมื่อ I คือ Second invariant

$$I = \left(\frac{\partial u}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial z} \right)^2 \quad (2.14)$$

และการทำการสมมติ Pressure gradient ในรูปแบบของ

$$\nabla p = \varepsilon \nabla \pi \quad (2.15)$$

ในการพิจารณาองค์ประกอบความเร็ว u และ w ในฟิล์มของน้ำมันหล่อลื่น เราสามารถที่จะใช้ Perturbation procedure ในการพิจารณาการเปลี่ยนแปลงของอัตราเยื้องศูนย์ (\mathcal{E}) ดังนี้

$$\begin{aligned} u &= u_0 + \varepsilon u_1 + \dots \\ v &= v_0 + \varepsilon v_1 + \dots \end{aligned} \quad (2.16)$$

ในทำนองเดียวกันค่า Second invariant (I) สามารถแสดงได้โดย

$$I = I_0 + \varepsilon I_1 + \dots \quad (2.17)$$

เมื่อ

$$I_0 = \left(\frac{\partial u_0}{\partial z} \right)^2 + \left(\frac{\partial v_0}{\partial z} \right)^2 \quad (2.18)$$

$$I_1 = 2 \left(\frac{\partial u_2}{\partial z} \frac{\partial u_1}{\partial z} + \frac{\partial v_2}{\partial z} \frac{\partial v_1}{\partial z} \right) \quad (2.19)$$

จากสมการ (2.13) จะพบว่าค่า Apparent viscosity จะแปรผันตามค่า Second invariant ดังนั้นค่า Apparent viscosity สามารถแสดงได้โดย

$$\mu^* = \mu_0 + \varepsilon \mu_1 + \dots \quad (2.20)$$

เมื่อ

$$\mu_0 = \mu^*(I_0)$$

$$\mu_1 = \left(\frac{\partial \mu^*}{\partial I} \right) \times I_{1|I=I_0} \quad (2.21)$$

โดยค่า Boundary condition สำหรับองค์ประกอบความเร็ว คือ

$$u(z=0) = U_1, \quad u(z=h) = U_2$$

$$v(z=0) = V_1, \quad v(z=h) = V_2 \quad (2.22)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ทำการแทนค่า (2.15) และ (2.20) ลงในสมการ (2.12) และ (2.22) โดยแยกผลลัพธ์ตามลำดับของ
อัตราส่วนเยื้องศูนย์ดังนี้

สมการอันดับศูนย์ภายใต้สภาวะคงตัว

$$\frac{\partial}{\partial z} \left(\mu_0 \frac{\partial u_z}{\partial z} \right) = 0, \quad \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu_0 \frac{\partial v_z}{\partial z} \right) = 0 \quad (2.23)$$

$$u_0(z=0) = U_1, \quad u_0(z=h) = U_2$$

$$v_0(z=0) = V_1, \quad v_0(z=h) = V_2 \quad (2.24)$$

และสมการอันดับหนึ่ง

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu_0 \frac{\partial u_z}{\partial z} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu_1 \frac{\partial u_0}{\partial z} \right) &= \frac{\partial \pi}{\partial x} \\ \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu_0 \frac{\partial v_z}{\partial z} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu_1 \frac{\partial v_0}{\partial z} \right) &= \frac{\partial \pi}{\partial y} \end{aligned} \quad (2.25)$$

$$u_1(z=0) = 0, \quad u_1(z=h) = 0$$

$$v(z=0) = 0, \quad v_1(z=h) = 0 \quad (2.26)$$

ทำการอินทิเกรตเทียบกับ y ในสมการ (2.23) โดยที่ค่าความหนืด μ_0 คงที่ จะได้ค่าองค์ประกอบ

ความเร็ว u_z และ v_z ดังนี้

$$\begin{aligned} u_0 &= \left(1 - \frac{z}{h}\right) U_1 + \frac{z}{h} U_2 \\ v_0 &= \left(1 - \frac{z}{h}\right) V_1 + \frac{z}{h} V_2 \end{aligned} \quad (2.27)$$

ทำการแทนสมการ (2.27) ลงในสมการ (2.26) จะได้

$$\begin{aligned} \mu_0 \frac{\partial^2 u_z}{\partial z^2} + 2 \frac{U_2 - U_1}{h} \frac{\partial \mu^*}{\partial z} \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{U_2 - U_1}{h} \frac{\partial u_z}{\partial z} + \frac{V_2 - V_1}{h} \frac{\partial v_z}{\partial z} \right) &= \frac{\partial \pi}{\partial x} \\ \mu_0 \frac{\partial^2 v_z}{\partial z^2} + 2 \frac{V_2 - V_1}{h} \frac{\partial \mu^*}{\partial z} \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{U_2 - U_1}{h} \frac{\partial u_z}{\partial z} + \frac{V_2 - V_1}{h} \frac{\partial v_z}{\partial z} \right) &= \frac{\partial \pi}{\partial y} \end{aligned} \quad (2.28)$$

ทำการจัดรูปสมการ (2.28)

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 u_z}{\partial z^2} &= \frac{1}{\mu_0} \frac{\partial \pi}{\partial x} - 2 \frac{U_2 - U_1}{h} \left(\frac{U_2 - U_1}{h} \frac{\partial \pi}{\partial x} + \frac{V_2 - V_1}{h} \frac{\partial \pi}{\partial y} \right) \frac{\partial \mu^*}{\partial z} / \left\{ \mu_0^2 \left(1 + \frac{\partial \ln \mu^*}{\partial \ln \Gamma^{0.5}} \right) \right\} \\ \frac{\partial^2 v_z}{\partial z^2} &= \frac{1}{\mu_0} \frac{\partial \pi}{\partial y} - 2 \frac{V_2 - V_1}{h} \left(\frac{U_2 - U_1}{h} \frac{\partial \pi}{\partial x} + \frac{V_2 - V_1}{h} \frac{\partial \pi}{\partial y} \right) \frac{\partial \mu^*}{\partial z} / \left\{ \mu_0^2 \left(1 + \frac{\partial \ln \mu^*}{\partial \ln \Gamma^{0.5}} \right) \right\} \end{aligned} \quad (2.29)$$

โดยใช้ความสัมพันธ์ของ

$$I_0 = \left(\frac{\partial u_0}{\partial z} \right)^2 + \left(\frac{\partial v_0}{\partial z} \right)^2 = \frac{1}{h^2} \{ (U_2 - U_1)^2 + (V_2 - V_1)^2 \} \quad (2.30)$$

$$2 \frac{I_0}{\mu_0} \left(\frac{\partial \mu^*}{\partial z} \right)_{I=I_0} = \left(\frac{\partial \ln \mu^*}{\partial \ln \Gamma^{0.5}} \right)_{I=I_0} \quad (2.31)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ทำการอินทิเกรตสมการ (2.29) จะได้สมการองค์ประกอบความเร็วอันดับ 1 u_1 และ v_1 ดังนี้

$$u_1 = - \frac{z(z-h)}{2} \frac{\partial^2 u_1}{\partial z^2}$$

$$w_1 = -\frac{z(z-h)}{2} \frac{\partial^2 v_2}{\partial z^2} \quad (2.32)$$

ทำการแทนค่าสมการ (2.27) และ (2.32) จะได้องค์ประกอบความเร็ว u และ v ดังนี้

$$\begin{aligned} u &= u_0 + \varepsilon u_1 \\ &= U_1 \left(1 - \frac{z}{h}\right) + \frac{\varepsilon}{H} U_2 - \frac{z(z-h)}{2\mu_0} \left\{ 1 - \frac{2 \frac{(U_2-U_1)^2 \partial \mu^*}{h^2 \mu_0 \partial t}}{1 + \frac{\partial \ln \mu^*}{\partial \ln t^{0.5}}} \right\} \frac{\partial p}{\partial x} \\ &\quad + \frac{z(z-h)}{2\mu_0} \left\{ \frac{(U_2-U_1)(V_2-V_1)}{h^2} \times \frac{2 \frac{\partial \mu^*}{\mu_0 \partial t}}{1 + \frac{\partial \ln \mu^*}{\partial \ln t^{0.5}}} \right\} \frac{\partial p}{\partial y} \\ v &= v_0 + \varepsilon v_1 \\ &= V_1 \left(1 - \frac{z}{h}\right) + \frac{\varepsilon}{h} W_2 + \frac{z(z-h)}{2\mu_0} \left\{ \frac{(U_2-U_1)(V_2-V_1)}{h^2} \times \frac{2 \frac{\partial \mu^*}{\mu_0 \partial t}}{1 + \frac{\partial \ln \mu^*}{\partial \ln t^{0.5}}} \right\} \frac{\partial p}{\partial x} \\ &\quad - \frac{z(z-h)}{2\mu_0} \left\{ 1 - \frac{2 \frac{(U_2-U_1)^2 \partial \mu^*}{h^2 \mu_0 \partial t}}{1 + \frac{\partial \ln \mu^*}{\partial \ln t^{0.5}}} \right\} \frac{\partial p}{\partial y} \end{aligned} \quad (2.33)$$

จากสมการความต่อเนื่อง (Continuity equation)

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\int_0^h u dz \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\int_0^h v dz \right) + w_2 = 0 \quad (2.34)$$

ทำการแทนสมการ (2.33) ลงใน (2.34) จะได้สมการโมดิไฟเอร์โนลด์ในรูปแบบทั่วไปดังนี้

$$\begin{aligned} &\frac{\partial}{\partial x} \left[\frac{h^3}{12\mu_0} \left\{ 1 - \frac{(U_2-U_1)^2 + (U_2-U_1)(V_2-V_1)}{(U_2-U_1)^2 + (V_2-V_1)^2} \frac{1}{1 + \frac{\partial \ln \mu^*}{\partial \ln t^{0.5}}} \right\} \frac{\partial p}{\partial x} \right] \\ &+ \frac{\partial}{\partial y} \left[\frac{h^3}{12\mu_0} \left\{ 1 - \frac{(U_2-U_1)(V_2-V_1) + (V_2-V_1)^2}{(U_2-U_1)^2 + (V_2-V_1)^2} \frac{1}{1 + \frac{\partial \ln \mu^*}{\partial \ln t^{0.5}}} \right\} \frac{\partial p}{\partial y} \right] = \frac{U_2+U_1}{2} \frac{\partial h}{\partial x} + \frac{V_2+V_1}{2} \frac{\partial h}{\partial y} + w_2 \end{aligned} \quad (2.35)$$

โดยที่ค่า Apparent viscosity สามารถหาได้จากการทดลอง

2.2.3 การหาค่าสมการโมดิไฟเอร์โนลด์สำหรับ Power-Law model

จากรูปที่ - ที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง shear stress และ shear rate สามารถแสดง power law model ได้ดังนี้

$$\tau_{xy} = m \left\{ \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial z} \right)^2 \right\}^{\frac{n-1}{2}} \frac{\partial u}{\partial x} \quad (2.36)$$

$$\tau_{zy} = m \left\{ \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial z} \right)^2 \right\}^{\frac{n-1}{2}} \frac{\partial v}{\partial z} \quad (2.37)$$

เอกสารโดย Apparent คือ นไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา $m = \frac{\tau}{\dot{\gamma}^n}$ อ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการ (2.38) ้

โดยที่ค่าคงที่ m และ n สามารถหาได้จากการทดลอง

จากสมการ (2.38) ลงใน (2.35) จะได้สมการโมติฟายเรโนลด์สำหรับ Power law fluid ดังนี้

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial x} \left[\frac{h^{n+2}}{12m} \left[1 - \frac{n-1}{n} \frac{(U_2 - U_1)^2 + (V_2 - V_1)(V_2 - V_1)}{(U_2 - U_1)^2 + (V_2 - V_1)^2} \right] \frac{\partial p}{\partial x} \right] \\ & + \frac{\partial}{\partial y} \left[\frac{h^{n+2}}{12m} \left[1 - \frac{n-1}{n} \frac{(U_2 - U_1)(V_2 - V_1) + (V_2 - V_1)^2}{(U_2 - U_1)^2 + (V_2 - V_1)^2} \right] \frac{\partial p}{\partial y} \right] \\ & = \left\{ (U_2 - U_1)^2 + (V_2 - V_1)^2 \right\} \frac{n-1}{2} \left\{ \frac{U_2 + U_1}{2} \frac{\partial h}{\partial x} + \frac{V_2 + V_1}{2} \frac{\partial h}{\partial y} + w_2 \right\} \end{aligned} \quad (2.39)$$

เมื่อ $V_1 = V_2 = 0$

และ ในสภาวะคงตัว ($w_2 = 0$) สมการโมติฟายเรโนลด์สามารถเขียนได้เป็น

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{h^{n+2}}{12m} \frac{\partial p}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{h^{n+2}}{12m} \frac{\partial p}{\partial y} \right) = \frac{u^n}{2} \frac{\partial h}{\partial x} + w_2 \quad (2.40)$$

2.2.4 การวิเคราะห์หน่วยไร้มิติ (Dimensionless analysis)

จากสมการ (2.1) สามารถเขียนอยู่ในรูปสภาวะคงตัวดังนี้

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[\frac{h^{n+2}}{12m} \frac{\partial p}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[\frac{h^{n+2}}{12m} \frac{\partial p}{\partial z} \right] = \frac{u^n}{2} \frac{\partial h}{\partial x} \quad (2.41)$$

โดยการแทนค่าตัวแปรไร้มิติดังนี้

$$x = R\theta$$

$$y = Ly'$$

$$h = ch'$$

$$(2.42)$$

เนื่องจากสมการโมติฟายเรโนลด์ที่วิเคราะห์ค่าความหนืดจึงจัดอยู่ในรูปความดันไร้มิตินี้

จาก

$$u = m \left[\frac{u}{c} \right]^{n-1} \quad (2.43)$$

จะได้

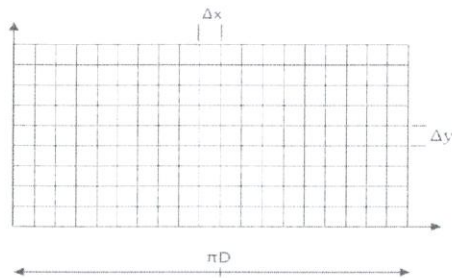
$$P = \frac{mR u^n}{c^{n+2}} P^* \quad (2.44)$$

ทำการแทนค่าสมการ (2.42) และ (2.44) ลงใน (2.41) จะได้สมการโมติฟายเรโนลด์ในรูปแบบไร้มิตินี้

$$\frac{\partial}{\partial \theta} \left[h^{*n+2} \frac{\partial P^*}{\partial \theta} \right] + \frac{n}{4} \left(\frac{D}{L} \right)^2 \frac{\partial}{\partial y^*} \left[h^{*n+2} \frac{\partial P^*}{\partial y^*} \right] = 6n \frac{\partial h^*}{\partial \theta} \quad (2.45)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.5 การวิเคราะห์การบรอนเส้นเพลากลมด้วยวิธีผลต่างจำกัด



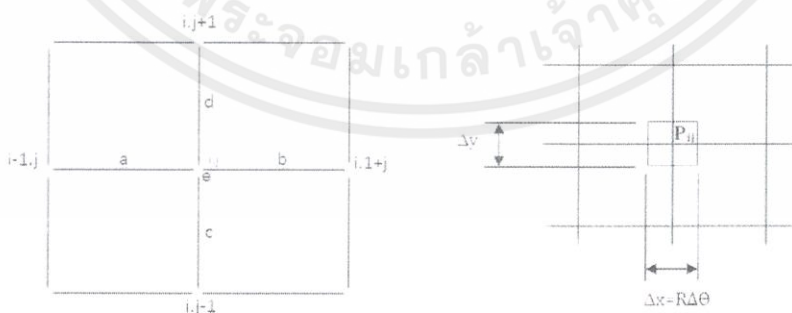
รูปที่ 2-4 แสดงพื้นผิวของกาบรอนแบริงที่นำมาทางออก

พิจารณาฟิล์มน้ำมันในช่องว่างระหว่างเพลากับกาบรอนเส้น โดยการเคลือบฟิล์มน้ำมันออกแล้วแบ่งฟิล์มน้ำมันออกเป็นชั้นสี่เหลี่ยมเล็ก ๆ มีความยาวตามแกน x เท่ากับ Δx และความกว้างตามแกน y เท่ากับ Δy ตามรูปที่ 2-4 และกำหนดจุดปม i, j ของชั้นสี่เหลี่ยมเล็ก ๆ ตามรูปที่ 2-5 เนื่องจากสมการเรโนลด์สามารถอธิบายพฤติกรรมของสารหล่อลื่นที่จุดใดๆ ในฟิล์มของน้ำมันหล่อลื่น ดังนั้นจึงสามารถเขียนสมการโมดิไฟยเรโนลด์ตามสมการ (2.45) ในรูปแบบของผลต่างจำกัดดังนี้จากรูปที่ 2-5 เมื่อใช้ Central different จะได้

$$\begin{aligned} \frac{\partial p^*}{\partial \theta} &= \frac{P_{i,j+1}^* - P_{i,j-1}^*}{2(\Delta \theta)} & \frac{\partial^2 p^*}{\partial \theta^2} &= \frac{P_{i,j+1}^* - 2P_{i,j}^* + P_{i,j-1}^*}{(\Delta \theta)^2} \\ \frac{\partial p^*}{\partial y} &= \frac{P_{i+1,j}^* - P_{i-1,j}^*}{2(\Delta y^*)} & \frac{\partial^2 p^*}{\partial y^2} &= \frac{P_{i+1,j}^* - 2P_{i,j}^* + P_{i-1,j}^*}{(\Delta y^*)^2} \end{aligned} \quad (2.46)$$

แทนค่าสมการ (2.46) ลงใน (2.45) จะได้

$$\begin{aligned} & \left[\frac{h^{*n+2}}{(\Delta \theta)^2} - \frac{(n+2)h^{*n+1}}{2(\Delta \theta)} \frac{\partial h^*}{\partial \theta} \right] p_{i+1,j}^* - \left[\frac{2h^{*n+2}}{(\Delta \theta)^2} + \frac{2h^{*n+2}}{(\Delta y^*)^2} + \frac{n}{4} \left(\frac{D}{L} \right)^2 \right] p_{i,j}^* \\ & + \left[\frac{h^{*n+2}}{(\Delta \theta)^2} - \frac{(n+2)h^{*n+1}}{2(\Delta \theta)} \frac{\partial h^*}{\partial \theta} \right] p_{i-1,j}^* + \frac{n}{4} \left(\frac{D}{L} \right)^2 \frac{h^{*n+2}}{(\Delta y^*)^2} p_{i,j-1}^* = 6n \frac{\partial h^*}{\partial \theta} \end{aligned} \quad (2.47)$$



รูปที่ 2-5 แสดงแบบของผลต่างจำกัดสำหรับกาบรอนเส้นเพลากลม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์โดยกรมการศึกษานานาชาติ เมื่อผู้ยืมได้รับไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3 สมการพลังงาน

2.3.1 สมการอเดียแบติกเอนเนอร์ยี

จากกฎข้อที่หนึ่งของวิชาเทอร์โมไดนามิก ภายใต้เงื่อนไขสภาวะคงที่ จากรูปที่ 2-6 ที่แสดงสมดุลพลังงานที่ปริมาตรควบคุมการไหล ได้ดังนี้

$$E_o - E_i = H_{do} - H_{db} \tag{2.48}$$

เมื่อ E_i = ค่าพลังงานที่ถูกส่งผ่านภายใต้ปริมาตรควบคุม

E_o = ค่าพลังงานที่ถูกส่งผ่านโดยไม่ควบคุมปริมาตร

H_{do} = งานในปริมาตรควบคุมจากสภาพแวดล้อม

H_{db} = งานที่ได้จากการควบคุมปริมาตรสภาพแวดล้อม

จะได้

$$E_o - E_i = \left\{ \begin{aligned} & \left[\frac{\partial(\rho ue)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho ve)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho we)}{\partial z} \right] \\ & - j \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial T}{\partial z} \right) \right] \end{aligned} \right\} \Delta x \Delta y \Delta z \tag{2.49}$$

โดยที่ e = Intrinsic energy

$$E = \frac{u^2 + v^2 + w^2}{2} + j c_p T \tag{2.50}$$

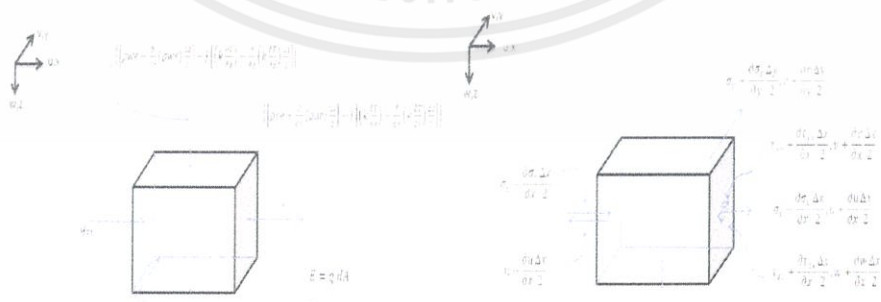
สมการพลังงานภายใต้สมมุติฐาน เป็นอุณหภูมิตั้งแต่

พลังงานกลบนพื้นผิวที่ควบคุมปริมาตร คือ

$$H_{do} - H_{db} = \left[\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial x} (u \tau_{xx} + v \tau_{xy} + w \tau_{xz}) + \frac{\partial}{\partial y} (u \tau_{xy} + v \tau_{yy} + w \tau_{yz}) \\ & + \frac{\partial}{\partial z} (u \tau_{xz} + v \tau_{zy} + w \tau_{zz}) \end{aligned} \right] \Delta x \Delta y \Delta z \tag{2.51}$$

แทนค่าสมการที่ (2.43) และ (2.51) ลงในสมการที่ (2.48) จะได้

$$\rho \left[u \frac{\partial e}{\partial x} + v \frac{\partial e}{\partial y} + w \frac{\partial e}{\partial z} \right] - j \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial T}{\partial z} \right) \right] = u \left(\frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} \right) + v \left(\frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_y}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial z} \right) + \left(\frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_z}{\partial z} \right) + \left(\sigma_x \frac{\partial u}{\partial x} + \sigma_y \frac{\partial v}{\partial y} + \sigma_z \frac{\partial w}{\partial z} \right) + \tau_{xz} \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right) + \tau_{yz} \left(\frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right) + \tau_{yx} \left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right) \tag{2.52}$$



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้ผู้ใดใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 2-6 แสดงการสมดุลพลังงานที่ปริมาตรควบคุมการไหล

จาก สมดุลแรงจะได้

$$\begin{aligned}\rho \left[u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right] &= \frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} \\ \rho \left[u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} \right] &= \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_y}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial z} \\ \rho \left[u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} \right] &= \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_z}{\partial z}\end{aligned}\quad (2.53)$$

แทนค่า สมการที่ (2.50) และสมการที่ (2.53) ลงในสมการที่ (2.52)

$$\begin{aligned}jp \left[\begin{array}{l} u \frac{\partial(c_p T)}{\partial x} + v \frac{\partial(c_p T)}{\partial y} \\ + w \frac{\partial(c_p T)}{\partial z} \end{array} \right] + p \left[\begin{array}{l} \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \\ + \frac{\partial w}{\partial z} \end{array} \right] \\ = J \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial T}{\partial z} \right) \right] + \Phi\end{aligned}\quad (2.54)$$

เมื่อ Dissipation energy (Φ)

$$\Phi = \mu \left[\begin{array}{l} 2 \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + 2 \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 + 2 \left(\frac{\partial w}{\partial z} \right)^2 + 2 \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} \right)^2 \\ - \left(\frac{\partial u}{\partial x} - \frac{\partial w}{\partial x} \right)^2 - \left(\frac{\partial w}{\partial y} - \frac{\partial v}{\partial z} \right)^2 - \left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right)^2 \end{array} \right]\quad (2.55)$$

สมมติให้ฟิล์มมีความบางมากเมื่อนำมาเปรียบเทียบกับฟิล์มขนาดอื่นๆ และ Specific heat (C_p) มีค่าคงที่ จะสามารถเขียนสมการได้เป็น

$$\rho J c_p \left(\begin{array}{l} u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} \\ + w \frac{\partial T}{\partial z} \end{array} \right) = J \left(\begin{array}{l} \frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial T}{\partial y} \right) \\ + \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial T}{\partial z} \right) \end{array} \right) + \mu \left\{ \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 \right\}\quad (2.56)$$

ความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดและอุณหภูมิจากการทดลอง จะได้

$$\mu = \mu_0 e^{-\alpha(T-T_0)}\quad (2.57)$$

เมื่อ

$$T = T(x, y), p = p(x, y), v \cong 0\quad (2.58)$$

และ

$$\mu = \mu(x, y)\quad (2.59)$$

ภายใต้สมมติฐานดังกล่าว ทำการอินทิเกรตสมการที่ (2.56)

$$\rho J c_p \int_0^h \left(u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} + w \frac{\partial T}{\partial z} \right) dz - J \int_0^h \left\{ \frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial T}{\partial y} \right) \right\} dz$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งยังห้ามทำซ้ำหรือดัดแปลง (Reproduction) ในรูปแบบใดๆ การที่ผู้ใดทำซ้ำโดยไม่ได้รับอนุญาต (Unauthorized reproduction) จะถือว่าผิดกฎหมาย (Illegal) และจะมีความผิดตามกฎหมายว่าด้วยการคุ้มครองสิทธิบัตร (Patent Law) และกฎหมายว่าด้วยการคุ้มครองสิทธิบัตร (Copyright Law) (2.60) ๕

จากรูปที่ 2-7 สามารถแสดงการหาค่าการนำความร้อนได้จาก

$$k \left. \frac{\partial T}{\partial z} \right|_h = k \left. \frac{\partial T}{\partial x} \frac{\partial h}{\partial x} \right|_h + k \left. \frac{\partial T}{\partial y} \frac{\partial h}{\partial y} \right|_h + K_s (T - T_s)$$

$$k \left. \frac{\partial T}{\partial z} \right|_0 = K_r (T - T_r)$$

และ

$$\int_0^h \left\{ \frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial T}{\partial y} \right) \right\} dz = \frac{\partial}{\partial x} \left(kh \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(kh \frac{\partial T}{\partial y} \right) - k \left. \frac{\partial T}{\partial x} \frac{\partial h}{\partial x} \right|_h - k \left. \frac{\partial T}{\partial y} \frac{\partial h}{\partial y} \right|_h$$

เมื่อ T_r และ T_s คือ Stator และ Runner อุณหภูมิพื้นผิว และ K_s, K_r คือ สัมประสิทธิ์การแลกเปลี่ยนความร้อน

ภายใต้เงื่อนไข จะได้ u และ v คือ

$$u = \frac{1}{2\mu} \frac{\partial p}{\partial x} z(z-h) + U \frac{z}{h}$$

$$v = \frac{1}{2\mu} \frac{\partial p}{\partial y} z(z-h) \quad (2.61)$$



รูปที่ 2-7 แสดงการนำความร้อนบนพื้นผิวที่มีความชัน

จากส่วนประกอบของความเร็วจากสมการที่ (2.61) จัดรูปได้

$$\int_0^h \left\{ \left(\frac{\partial u}{\partial z} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial z} \right)^2 \right\} dz = \left[u \frac{\partial u}{\partial x} \right]_0^h + \left[v \frac{\partial v}{\partial y} \right]_0^h - \int_0^h u \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} dz - \int_0^h v \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} dz$$

$$+ U \left. \frac{\partial u}{\partial z} \right|_h - \frac{\partial p}{\mu \partial x} \int_0^h u dz - \frac{\partial p}{\mu \partial y} \int_0^h v dz = \frac{U^2}{h} + \frac{h^3}{12\mu^2} \left\{ \left(\frac{\partial p}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial p}{\partial y} \right)^2 \right\} \quad (2.62)$$

แทนค่าผลที่ได้ในสมการที่ (2.60) จะได้

$$\rho J C_p \left\{ \left(\frac{hU}{2} - \frac{h^3}{12\mu} \frac{\partial p}{\partial x} \right) \frac{\partial T}{\partial x} - \frac{h^3}{12\mu} \frac{\partial p}{\partial y} \frac{\partial T}{\partial y} \right\} = \frac{\partial}{\partial x} \left(kh \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(kh \frac{\partial T}{\partial y} \right)$$

$$+ K_s (T - T_s) + K_r (T - T_r) + \frac{\mu U^2}{h} + \frac{h^3}{12\mu^2} \left\{ \left(\frac{\partial p}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial p}{\partial y} \right)^2 \right\} \quad (2.63)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ หาก Stator และ Runner เป็นฉนวน จะได้สมการ คือ

$$\rho J C_p \left\{ \left(\frac{hU}{2} - \frac{h^3}{12\mu} \frac{\partial p}{\partial x} \right) \frac{\partial T}{\partial x} - \frac{h^3}{12\mu} \frac{\partial p}{\partial y} \frac{\partial T}{\partial y} \right\} = \frac{\mu U^2}{h} + \frac{h^3}{12\mu} \left\{ \left(\frac{\partial p}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial p}{\partial y} \right)^2 \right\} \quad (2.64)$$

2.3.2 การวิเคราะห์การบรอนกลืนเพลากลมด้วยวิธีผลต่างจำกัด

ทำการวิเคราะห์เพิ่มเติมในส่วนของอุณหภูมิ ในลักษณะเดียวกันกับ หัวข้อ 2.2.5 จะได้ว่า

$$\begin{aligned}\frac{\partial T}{\partial \theta} &= \frac{T_{i+1,j} - T_{i,j}}{(\Delta \theta)} \\ \frac{\partial T}{\partial y} &= \frac{T_{i,j+1} - T_{i,j}}{(\Delta y)} \\ \frac{\partial P}{\partial \theta} &= \frac{P_{i+1,j} - P_{i,j}}{(\Delta \theta)} \\ \frac{\partial P}{\partial y} &= \frac{P_{i,j+1} - P_{i,j}}{(\Delta y)}\end{aligned}\quad (2.65)$$

เมื่อนำสมการ (2.65) แทนลงในสมการ (2.64) จะได้สมการพลังงานในหน่วยไร้มิติเป็น

$$\rho_j c_p \left\{ \left(\frac{hU}{2} - \frac{h^3}{12\mu(\rho_j)} \left(\frac{P_{i+1,j} - P_{i,j}}{\Delta x} \right) \right) \left(\frac{T_{i+1,j} - T_{i,j}}{\Delta x} \right) - \frac{h^3}{12\mu(\rho_j)} \left(\frac{P_{i,j+1} - P_{i,j}}{\Delta y} \right) \left(\frac{T_{i,j+1} - T_{i,j}}{\Delta y} \right) \right\} \\ = \frac{hU^2}{k} - \frac{h^3}{12\mu(\rho_j)} \left\{ \left(\frac{P_{i+1,j} - P_{i,j}}{\Delta x} \right)^2 + \left(\frac{P_{i,j+1} - P_{i,j}}{\Delta y} \right)^2 \right\}\quad (2.66)$$

2.4 สารหล่อลื่น

2.4.1 ความหนืดจลน์

ค่าความหนืดจลน์ (η_k) คือ

$$\eta_k = \frac{\text{ความหนืดพล}}{\text{ความหนาแน่นของไหล}} = \frac{\eta}{\rho} = \frac{N \cdot s / m^2}{N / m^2} = \frac{m^2}{s}\quad (2.67)$$

ความหนาแน่น (มวล) ของของไหล คือ มวลต่อปริมาตรหนึ่งหน่วยจาก

$$\rho = \frac{(kg)_{มวล}}{m^3}\quad (2.68)$$

เมื่อมวลหนึ่งกิโลกรัมมีค่าเท่ากับแรงหนึ่งกิโลกรัมตามความเร่งโน้มถ่วงของโลก จะได้

$$\begin{aligned}\frac{(kg)_{มวล}}{m^3} &= \frac{N \cdot s^2}{m^3} \\ \rho^* &= \rho\end{aligned}\quad (2.69)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ ρ' = ความหนาแน่น (มวล)

ρ = ความหนาแน่น (แรง)

จาก สมการที่ 1 จะทำให้ทราบถึงหน่วยของความหนืดจลน์ดังนี้

1 หน่วย SI : m^2/s

2 หน่วย cgs : cm^2/s หรือเรียกอีกอย่างว่า St (stoke)

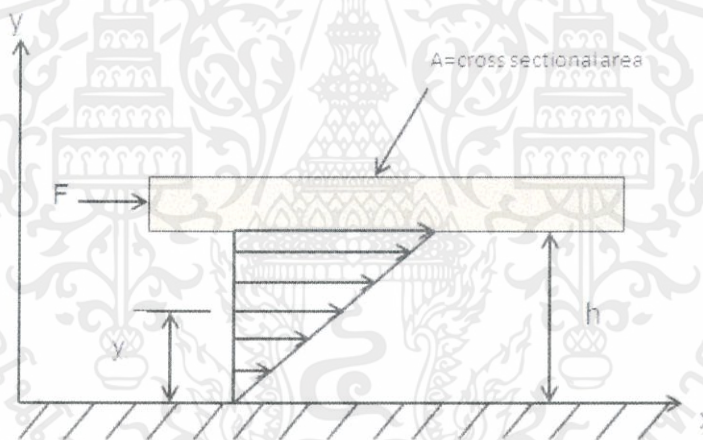
3 หน่วย อังกฤษ : in^2/s

2.4.2 ประเภทของสารหล่อลื่น

โดยปกติของเหลวที่สามารถใช้เป็นสารหล่อลื่นแบ่งตามลักษณะคุณสมบัติมีอยู่ 2 ประเภท คือ

1 สารหล่อลื่นนิวโทเนียน

สามารถอธิบายถึงคุณสมบัติของสารหล่อลื่นนิวโทเนียนได้ดังรูปที่ 2-8 นั่นคือถ้าสารหล่อลื่นนิวโทเนียนอยู่ระหว่างแผ่นราบทั้งสองเมื่อมีแรง F มากระทำกับแผ่นราบด้านบน ซึ่งมีพื้นที่สัมผัสสารหล่อลื่น A เคลื่อนที่ด้วยความเร็ว U



รูปที่ 2-8 แสดงการเปลี่ยนรูปของสารหล่อลื่นนิวโทเนียนเมื่อถูกแรงเฉือน F

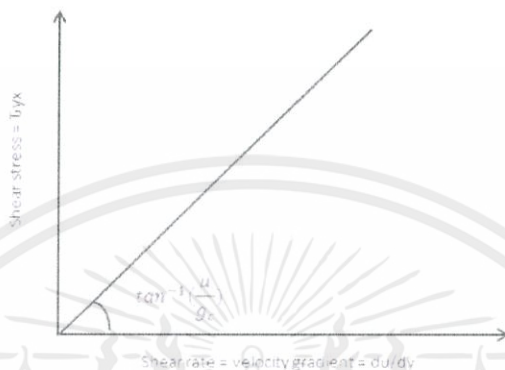
จากรูปแรงเฉือน F จะแปรผันโดยตรงกับพื้นที่ A และความเร็ว U และแปรผกผันกับระยะ Y สามารถเขียนในสมการได้คือ

$$F = \mu \frac{AU}{y} \quad (2.70)$$

โดยที่ μ คือ แพกเตอร์ของสัดส่วนหรือเรียกว่าความหนืดเชิงพลวัต (Dynamic viscosity) ดังนั้นความเค้นจะหาได้จากสมการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ในการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อัตราส่วน $\frac{\tau}{\dot{\gamma}}$ คือ อัตราการเปลี่ยนรูปร่างเชิงมุมของสารหล่อลื่นนิวโทเนียน สามารถเขียนแทนได้ในเทอม $\frac{d u}{d y}$ แทน $\frac{\tau}{\dot{\gamma}}$ ได้
 ดังนั้นความเค้นเฉือน $\tau = \mu \frac{d u}{d y}$ หากนำค่าความสัมพันธ์ของความเค้นเฉือนกับอัตราการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของสารหล่อลื่นนิวโทเนียนจะได้ดังรูปที่ 2-9



รูปที่ 2-9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือน (τ) และอัตราการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง $\frac{d u}{d y}$ ของสารหล่อลื่นนิวโทเนียน

2 สารหล่อลื่นประเภทนอน-นิวโทเนียน

ได้มีความพยายามศึกษาพัฒนานำสารหล่อลื่นนอนนิวโทเนียนมาใช้เพื่อแก้ปัญหาของสารหล่อลื่นนิวโทเนียนที่เมื่ออุณหภูมิของเครื่องจักรสูงขึ้น ค่าความหนืดจะลดลง การพัฒนาสารหล่อลื่นนอน-นิวโทเนียนอาจทำได้โดยการใช้สารแต่งเติมชนิด high molecular weight เช่น Polyisobutylene, Acrylatecopolymer เติมลงไปนในสารหล่อลื่นนิวโทเนียน จะทำให้อัตราเปลี่ยนแปลงความหนืดของสารหล่อลื่นลดลงเมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนแปลง ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือน และอัตราการเปลี่ยนรูปร่างของสารหล่อลื่นนอน-นิวโทเนียนเป็นไปดังสมการ

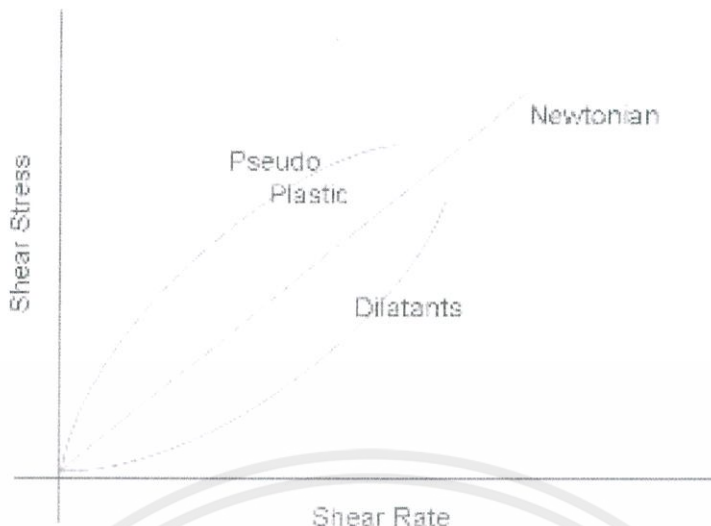
$$\tau_{yx} = m \left(\frac{d u}{d y} \right)^n \tag{2.72}$$

เมื่อ m = consistency index

n = flow behavior index

หากค่า $m = \mu$ และ $n = 1$ จะมีคุณสมบัติเป็นสารหล่อลื่นนิวโทเนียน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

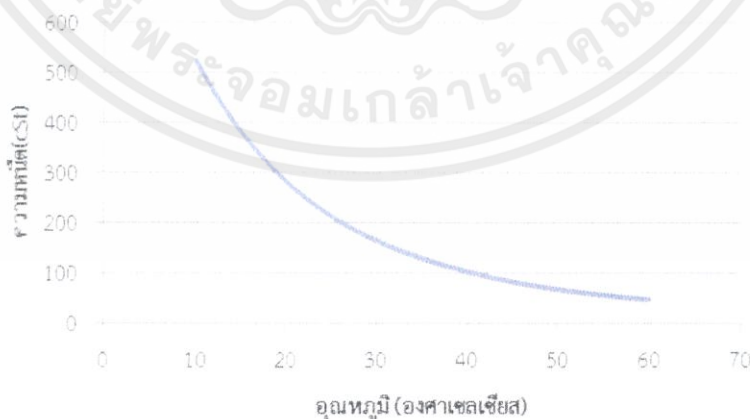


รูปที่ 2-10 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือนกับอัตราการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของสารหล่อลื่นชนิดต่างๆ

2.4.3 ผลของอุณหภูมิที่ทำให้ความหนืดของสารหล่อลื่นเปลี่ยน

ความหนืด (Viscosity) หมายถึง ความต้านทานต่อการไหลของของเหลว เราสามารถวัดความหนืด โดยพิจารณาที่ความข้นเหลว (Fluidity) ซึ่งมีวิธีการวัดความหนืดหลายวิธี โดยเครื่องมือที่ใช้สำหรับการวัดความหนืด เรียกว่า มาตรฐานความหนืด หรือวิสโคมิเตอร์ (Viscometer) ในการวัดความหนืดไม่ว่าจะโดยวิธีใดก็ตาม อุณหภูมิมาตรฐานที่กำหนดให้ใช้คือ 25 องศาเซลเซียส เพราะอุณหภูมิจะมีผลต่อความหนืดมากโดยที่ความหนืดของของเหลวทุกชนิด จะมีค่าลดลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ซึ่งเป็นเหตุมาจากพลังงานจลน์

ความหนืดของสารหล่อลื่นที่ใช้ในการทดลอง ได้แก่ สารหล่อลื่น ชนิดของไหลนิวโทเนียน 10W-40 ซึ่งมีความหนืดดังรูปที่ 2-11



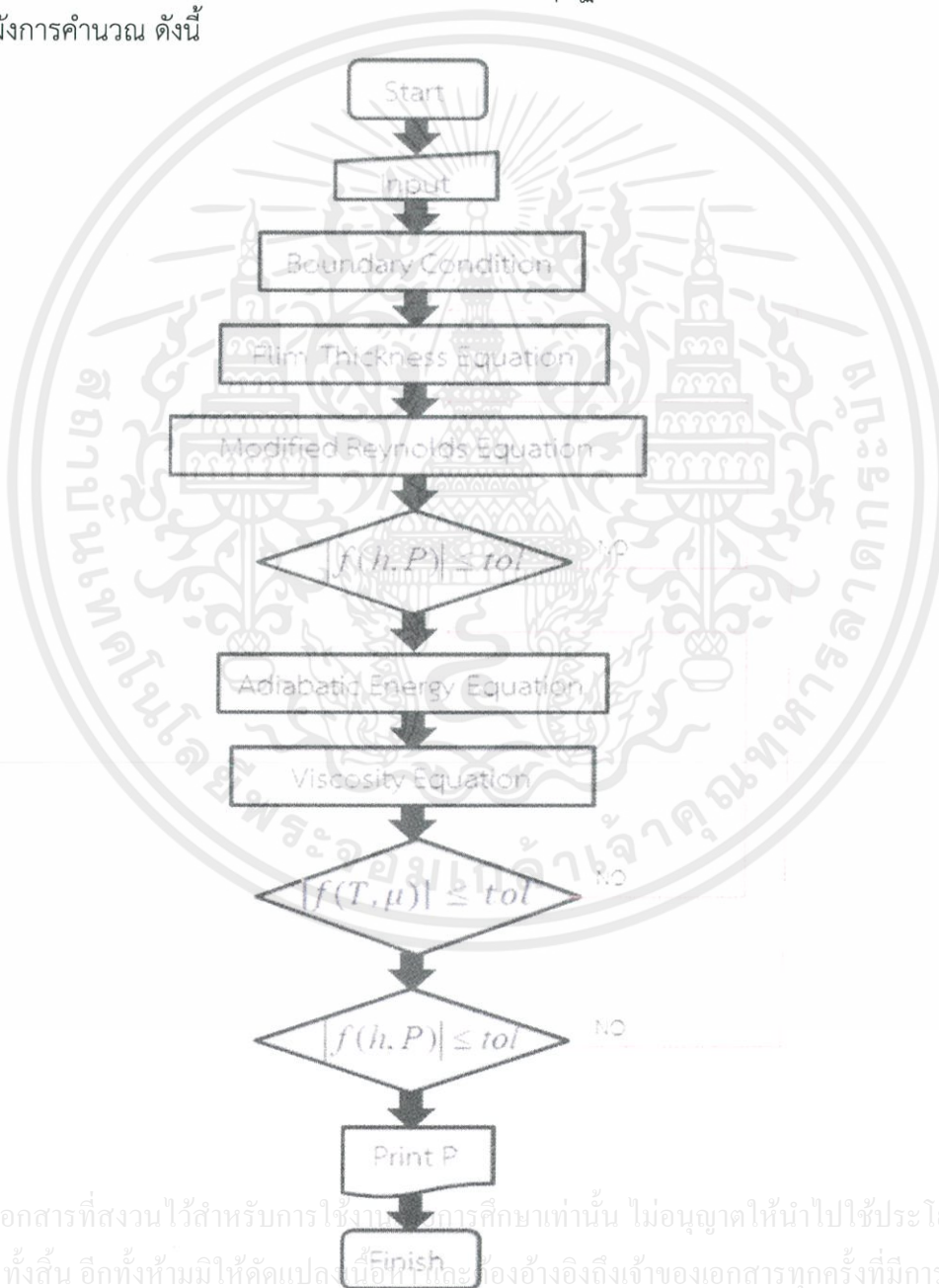
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
รูปที่ 2-11 แสดงค่าความหนืดที่อุณหภูมิต่างๆ
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงชื่อของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5 การคำนวณพฤติกรรมสถิตยของสารหล่อลื่นที่ใช้ในการทดลอง

เมื่อทราบพฤติกรรมการไหลของสารหล่อลื่นแล้ว ใช้สมการเรโนลด์ในการหาค่าการกระจายความดันในฟิล์มน้ำมัน โดยใช้การประมาณทางคณิตศาสตร์คือ Power law model เพื่อหาค่าคงที่และค่าครรชนีของ power law เพื่อนำไปคำนวณในสมการโมดิไฟเอดเรโนลด์ โดยการคำนวณจะกำหนดสภาวะขอบเขตของความดันไว้มิติ คือ

$$\begin{aligned} P^*(i,0) = 0 \quad , \quad P^*(i,1) = 0 \\ P^*(0,j) = 0 \quad , \quad P^*(180,j) = 0 \end{aligned} \quad (2.73)$$

และวิธีการคำนวณจะใช้วิธีการไฟไนต์ดิฟเฟอเรนซ์ตามทฤษฎีที่กล่าวข้างต้น ซึ่งสามารถเขียนเป็นแผนผังการคำนวณ ดังนี้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานทางการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและโครงสร้างของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

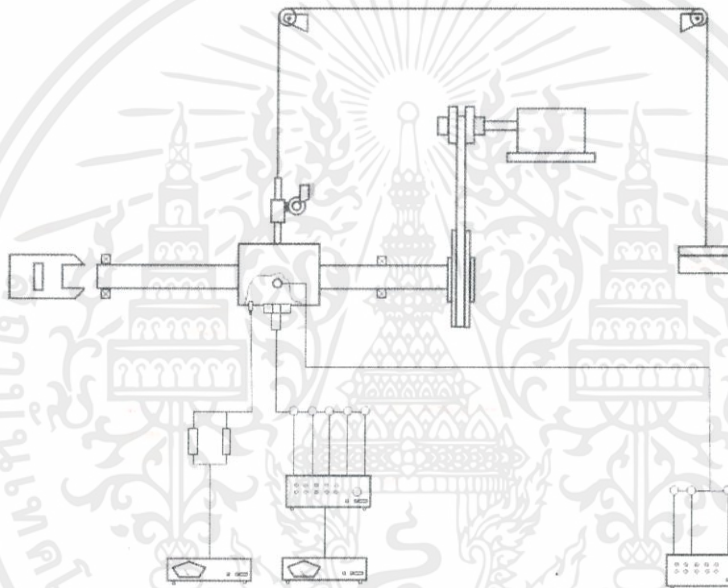
รูปที่ 2-12 แสดงแผนผังลำดับการหาการกระจายของความดันแบบไร้มิติ

บทที่ 3

การทดลอง

3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

หัวข้อนี้จะกล่าวถึงการออกแบบชุดทดลอง อุปกรณ์การทดลอง และอุปกรณ์การวัดค่าต่างๆที่เกี่ยวข้องกับการทดลองแบร์ริงเพลากลม โดยลักษณะของกาบรองลื่นที่นำมาใช้ในการทดลองเป็นกาบรองลื่นชนิดไม่เต็มวงกลมที่มีความยืดหยุ่น มีมอเตอร์ขับเคลื่อนเพลากลมในกาบรองลื่นที่มีน้ำหนักถ่วง เพื่อทำให้เกิดภาวะกระทำต่อเพลากลมและกาบรองลื่น โดยชุดการทดลองแสดงในรูปที่ 3-1



รูปที่ 3.1 โดยแกรมแสดงเครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

3.1.1 ชุดขับเคลื่อน

3.1.1.1 มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับ 3 เฟส แบบอินดักชัน

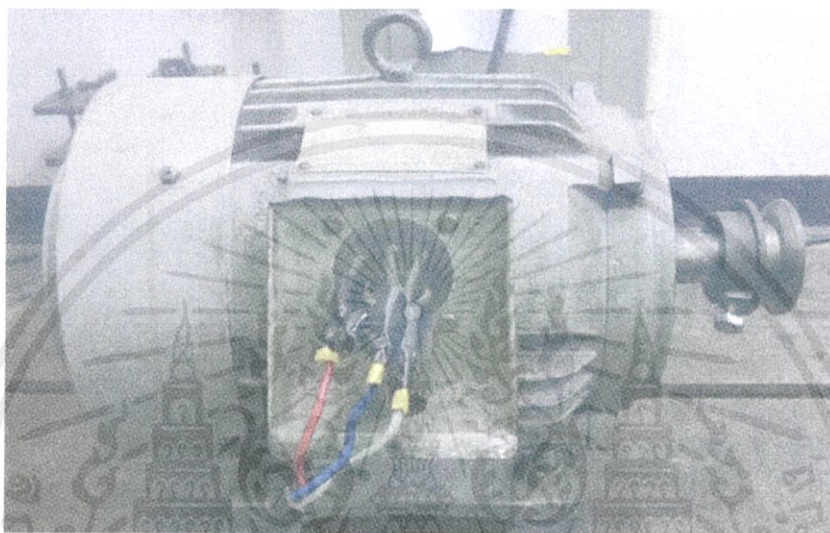
1 หลักการทำงานของอุปกรณ์

มอเตอร์ที่ใช้กับระบบไฟฟ้ากระแสสลับ เป็นเครื่องกลไฟฟ้าที่ทำหน้าที่เปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าให้เป็นพลังงานกล ส่วนที่ทำหน้าที่เปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าคือขดลวดในสเตเตอร์ และส่วนที่ทำหน้าที่ให้พลังงานกลคือตัวหมุนหรือโรเตอร์ ซึ่งเมื่อขดลวดในสเตเตอร์ได้รับพลังงานไฟฟ้าก็จะสร้างสนามแม่เหล็กขึ้นมาในตัวที่อยู่กับที่หรือสเตเตอร์ สนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นนี้จะมีการเคลื่อนที่หรือหมุนไปรอบๆสเตเตอร์ เนื่องจากความต่างเฟสของกระแสไฟฟ้าในขดลวดและการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้า ในขณะที่สนามแม่เหล็กเคลื่อนที่ สนามแม่เหล็กจากขั้วเหนือก็จะพุ่งเข้าหาขั้วใต้และไปตัดกับตัวนำที่เป็นวงจรมอเตอร์หรือขดลวดกรงกระรอกของตัวหมุนหรือโรเตอร์ ทำให้

เกิดการเหนี่ยวนำของกระแสไฟฟ้าขึ้นในขดลวดของโรเตอร์ ซึ่งสนามแม่เหล็กของโรเตอร์นี้จะเคลื่อนที่ตามทิศทางการเคลื่อนที่ของสนามแม่เหล็กที่สเตเตอร์ ก็จะทำให้โรเตอร์ของมอเตอร์เกิดจะพลังงานกลสามารถนำไปใช้ประโยชน์ที่ต้องการหมุนได้

2 รายละเอียดของอุปกรณ์

มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับ 3 เฟส แบบอินดักชันที่มีความเร็วรอบเท่ากับ 1420 รอบต่อนาที แสดงดังรูปที่ 3-2



รูปที่ 3-2 มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับ 3 เฟส แบบอินดักชัน

3.1.1.2 พูล์ (Pulley)

1 หลักการทำงานของอุปกรณ์

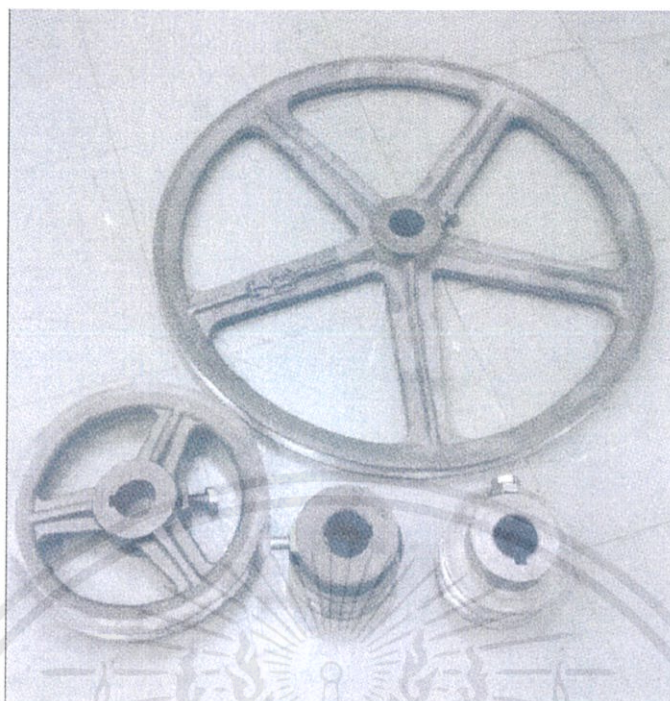
อุปกรณ์ที่ใช้ในการเปลี่ยนความเร็วรอบของมอเตอร์ในการทดลอง

2 รายละเอียดของอุปกรณ์

ขนาดของพูล์ที่ใช้ในการทดลองมี 4ขนาด คือ 2.5 นิ้ว, 3 นิ้ว, 7 นิ้ว และ 16 นิ้ว

ดังรูปที่ 3-3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3-3 พูเล่ขนาดต่างๆ ที่ใช้ในการทดลอง

3.1.1.3 เฟลา (Journal)

1 หลักการทำงานของอุปกรณ์

อุปกรณ์ที่ต่อเข้ากับพูเล่ผ่านสายพานกับมอเตอร์เพื่อขับให้หมุนในกาบรอง

2 รายละเอียดของอุปกรณ์

เฟลาที่ใช้ในการทดลองจะใช้เฟลาขนาดเดียวคือ มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 มิลลิเมตร มีความยาวที่ใช้งาน 600 มิลลิเมตรคือมีความยาวของเฟลาจะมีความยาวมากกว่ากาบรองสั้น ดังรูปที่ 3-4



เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ห้ามเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และข้อมูลอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 3-4 เฟลาที่ใช้ในการทดลอง

3.1.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการรับภาระ

3.1.2.1 แบริ่ง (Bearing)

1 หลักการทำงานของอุปกรณ์

เป็นอุปกรณ์ที่ใช้รับแรงและน้ำหนักในขณะที่เพลากำลังหมุน

2 รายละเอียดของอุปกรณ์

แบริ่งที่ใช้ในการทดลองเป็นชนิดแบบไม่เต็มวง โดยใช้วัสดุชนิดยึดหยุ่นได้เป็น กาบรองลื่น ดังรูปที่ 3-5



รูปที่ 3-5 แบริ่งที่ใช้ในการทดลอง

3.1.2.2 น้ำหนัก (Weight)

1 หลักการทำงานของอุปกรณ์

เป็นอุปกรณ์ที่ใช้เพิ่มภาระของเพลลา เพื่อหาพฤติกรรมของแบริ่งของแต่ละสภาวะที่มีน้ำหนักต่างกัน

2 รายละเอียดของอุปกรณ์

น้ำหนักที่ใช้ในการทดลอง ใช้น้ำหนักขนาด 10 กิโลกรัม, 20 กิโลกรัม, 30 กิโลกรัม และ 40 กิโลกรัม ดังรูปที่ 3-6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3-6 น้ำหนักที่ใช้ในการทดลอง

3.1.2.3 ชุดวางน้ำหนัก

1 หลักการทำงานของอุปกรณ์

เป็นอุปกรณ์ที่ใช้รองรับของกอน้ำหนักที่เป็นตัวเพิ่มภาระให้แก่เพลลาในการทดลอง

2 รายละเอียดของอุปกรณ์

การทดลองจะใช้แท่นวางน้ำหนักมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 150 มิลลิเมตร และมีความหนา 10 มิลลิเมตร ดังรูปที่ 3-7



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้เฉพาะในห้องปฏิบัติการเท่านั้น หากมีข้อผิดพลาดใดๆ กรุณาแจ้งให้ทราบโดยด่วน
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้รูปที่ 3-7 ชุดวางน้ำหนักที่ใช้ในการทดลองเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.2.4 น้ำมัน (Oils)

1 หลักการทำงานของอุปกรณ์

ใช้น้ำมันเป็นสารหล่อลื่น เพื่อใช้ในการศึกษาพฤติกรรมของฟิล์มน้ำมันของแบร็งเพลากลมที่มีความยืดหยุ่น

2 รายละเอียดของอุปกรณ์

น้ำมันที่ใช้ในการทดลองคือ สารหล่อลื่น ชนิดของไหลนิวโตเนียน 10W-40

ดังรูปที่ 3-8



รูปที่ 3-8 น้ำมันที่ใช้ในการทดลอง (10W - 40)



รูปที่ 3-9 ภาชนะที่ใส่และควบคุมการไหลน้ำมันที่ใช้ในการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ภายในห้องปฏิบัติการเท่านั้น และห้ามนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกหนึ่งปีให้หลังไปก็ยังคงมีความสนใจในเอกสารทดลองนี้ที่มีการนำไปใช้

3.1.3 อุปกรณ์ที่ใช้ในการคาร์เบต

3.1.3.1 ไมโครมิเตอร์ (Micrometer)

1 หลักการทำงานของอุปกรณ์

ใช้ไมโครมิเตอร์ในการคาร์เบตอุปกรณ์วัดความหนาฟิล์ม เนื่องจากอุปกรณ์วัดความหนาฟิล์ม ต้องวัดความหนาที่มีค่าละเอียดมาก ไม่สามารถมองเห็นด้วยตาเปล่าได้ ไมโครมิเตอร์จึงเป็นอุปกรณ์การเทียบค่ามาตรฐานของการวัดและการสอบเทียบ

2 รายละเอียดของอุปกรณ์

ไมโครมิเตอร์ชนิดพิเศษ ดังรูปที่ 3-10



รูปที่ 3.10 ไมโครมิเตอร์ (Micrometer)

3.1.3.2 เครื่องสอบเทียบความดัน (Pressure calibrator)

1 หลักการทำงานของอุปกรณ์

เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการเทียบค่ามาตรฐานของอุปกรณ์วัดความดัน เพื่อให้ได้ อุปกรณ์ที่แสดงค่าที่มีความผิดพลาดน้อยที่สุด หรือค่าความผิดพลาดอยู่ในช่วงที่ยอมรับได้

2 รายละเอียดของอุปกรณ์

แสดงรายละเอียดดังรูปที่ 3-11

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3-11 เครื่องสอบเทียบความดัน (Pressure calibrator)

3.1.3.3 เทอร์โมมิเตอร์ (Thermometer)

1 หลักการทำงานของอุปกรณ์

ใช้สำหรับวัดอุณหภูมิ ซึ่งจะประกอบด้วยสองส่วนสำคัญ ได้แก่ ส่วนตรวจวัดอุณหภูมิและส่วนแสดงผลซึ่งจะแปลงผลการวัดออกมาเป็นค่าที่แสดงถึงอุณหภูมิ ในการทดลองได้นำเทอร์โมมิเตอร์มาทำการคาร์ิเบตอุปกรณ์เพื่อวัดอุณหภูมิหรือเทอร์โมคัปเปิล

2 รายละเอียดของอุปกรณ์

แสดงดังรูปที่ 3-12



รูปที่ 3-12 เทอร์โมมิเตอร์ (Thermometer)

3.1.4 อุปกรณ์ที่ใช้บันทึกผลการทดลอง

3.1.4.1 ตัวแปลงสัญญาณความดัน (Pressure transducer)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษานานาชาติ ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1 หลักการทำงานของอุปกรณ์

การทดลองได้นำตัวแปลงสัญญาณความดันมาใช้แปลงสัญญาณที่ได้ในรูป

ของความดันแปลงเป็นพลังงานไฟฟ้า

2 รายละเอียดของอุปกรณ์

ในการทดลอง ใช้ตัวแปลงสัญญาณความดันชนิดสเตรนเกจ (strain-gage base transducer) ดังรูปที่ 3-13



รูปที่ 3-13 ตัวแปลงสัญญาณความดัน (Pressure transducer)

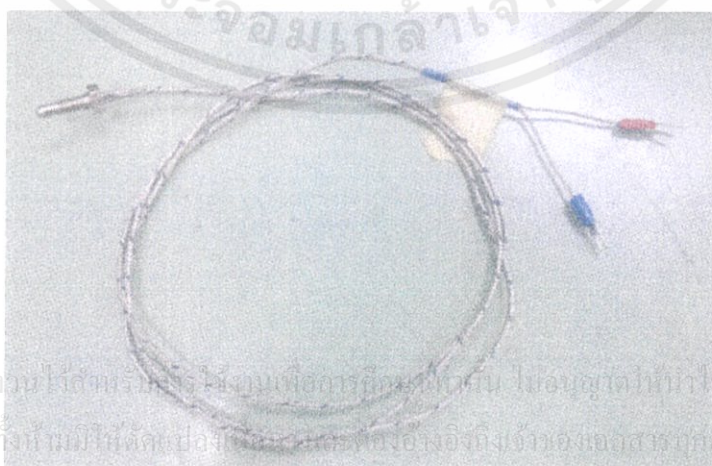
3.1.4.2 เทอร์โมคัปเปิล (Thermocouple)

1 หลักการทำงานของอุปกรณ์

ในการทดลองได้นำเอาเทอร์โมคัปเปิลมาติดตั้งเพื่อใช้ในการแปลงสัญญาณจากรูปพลังงานความร้อนมาเป็นพลังงานไฟฟ้าเพื่อที่จะหาอุณหภูมิ หากจุดวัดอุณหภูมิและจุดอ้างอิงมีอุณหภูมิต่างกันก็จะทำให้มีการนำกระแสในวงจรเทอร์โมคัปเปิลทั้งสองข้าง

2 รายละเอียดของอุปกรณ์

เทอร์โมคัปเปิลทำมาจากโลหะตัวนำที่ต่างชนิดกัน 2 ตัวนำมาเชื่อมต่อปลายทั้งสองเข้าด้วยกันที่ปลายด้านหนึ่ง เรียกว่าจุดวัดอุณหภูมิ ส่วนปลายอีกด้านหนึ่งปล่อยให้เปิดไว้ เรียกว่าจุดอ้างอิง ดังรูปที่ 3-14



รูปที่ 3-14 เทอร์โมคัปเปิล (Thermocouple)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ในห้องปฏิบัติการเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีให้ดูเพียงครั้งเดียวเท่านั้นจึงขอสงวนเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

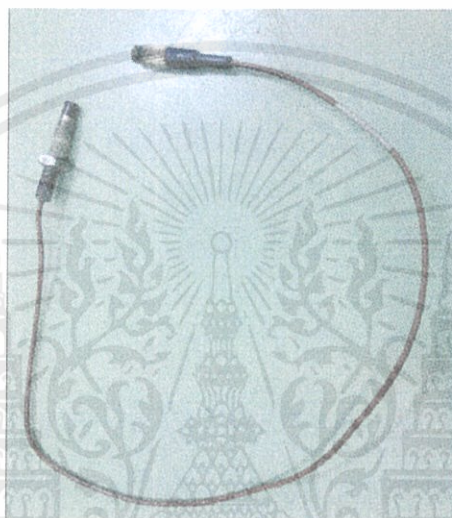
3.1.4.3 อุปกรณ์วัดความหนาฟิล์ม (Gap sensor)

1 หลักการทำงานของอุปกรณ์

ในชุดการทดลองนี้ใช้อุปกรณ์วัดความหนาฟิล์มในการวัดค่าความหนาของฟิล์มน้ำมัน โดยการส่งคลื่นสัญญาณไปกระทบกับผิวของโลหะและสะท้อนกลับมา อ่านค่าออกมาเป็น Volt และแสดงในมัลติมิเตอร์

2 รายละเอียดของอุปกรณ์

เป็นอุปกรณ์วัดความหนาฟิล์มน้ำมัน แสดงดังรูปที่ 3-15



รูปที่ 3.15 อุปกรณ์วัดความหนาฟิล์ม (Gap sensor)

3.1.4.4 โวลต์มิเตอร์ (Volt meter)

1 หลักการทำงานของอุปกรณ์

เครื่องมือที่ใช้วัดความต่างศักย์ระหว่างจุด 2 จุด ในวงจรความต้านทานภายในของเครื่องโวลต์มิเตอร์มีค่าสูง วิธีใช้ต้องต่อขนานกับวงจรเครื่องมือที่ใช้วัดค่าความต่างศักย์ในวงจรไฟฟ้า ค่าที่วัดได้มีหน่วย โวลต์ โวลต์มิเตอร์ เป็นเครื่องมือที่ดัดแปลงมาจากแอมมิเตอร์ โดยต่อความต้านทาน แบบอนุกรม (Rx) กับแอมมิเตอร์ และใช้วัดความต่างศักย์ในวงจรโดยต่อแบบขนานกับวงจรที่ต้องการวัด

2 รายละเอียดของอุปกรณ์

แสดงดังรูปที่ 3-16

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3-16 โวลมิเตอร์ (Volt meter)

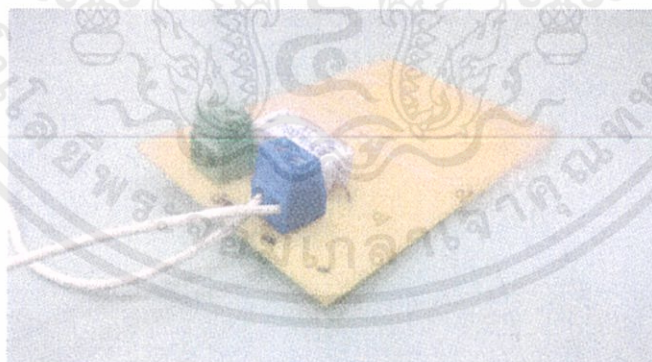
3.1.4.5 ตัวต้านทาน (Resistance)

1 หลักการทำงานของอุปกรณ์

เป็นอุปกรณ์ที่เชื่อมต่อเข้ากับวงจร เพื่อใช้ในการแปลงเก็บข้อมูลเป็นกระแส เป็นการเก็บข้อมูลค่าความต่างศักย์แทน ในการทดลองได้นำตัวต้านทานมาต่อเข้ากับวงจรของอุปกรณ์วัดความดัน

2 รายละเอียดของอุปกรณ์

ใช้ตัวต้านทานที่มีค่าความต้านทานเท่ากับ 1000 โอห์ม แสดงดังรูปที่ 3-17



รูปที่ 3-17 ตัวต้านทาน (Resistance)

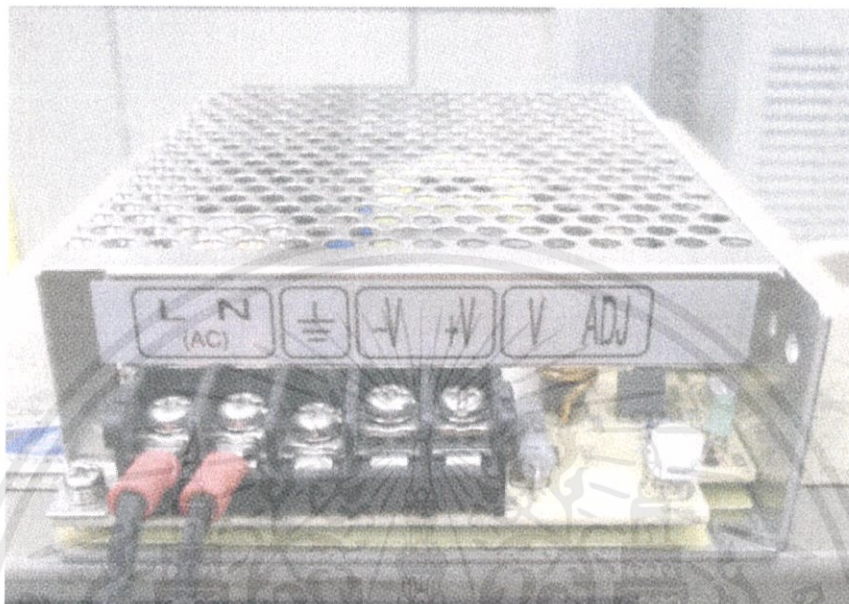
3.1.4.6 ตัวจ่ายไฟ (Power supply)

1 หลักการทำงานของอุปกรณ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 อุปกรณ์หลักที่คอยจ่ายไฟให้กับชิ้นส่วนและอุปกรณ์ต่างๆทั้งหมดภายในเครื่อง มีรูปร่างเป็นกล่องสี่เหลี่ยมติดตั้งอยู่ภายในตัวเคส (สามารถถอดเปลี่ยนได้) ทำหน้าที่เป็นตัวอุปกรณ์ที่คอยแปลงกระแสสลับให้เป็นกระแสตรงให้กับอุปกรณ์ที่ใช้ในการบันทึกผล

2 รายละเอียดของอุปกรณ์

เป็นตัวอุปกรณ์ที่คอยแปลงกระแสสลับให้เป็นกระแสตรงให้กับอุปกรณ์ที่ใช้ในการบันทึกผลแปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ (AC) ตามบ้านจาก 220 โวลต์ให้เหลือเพียงแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง (DC) แสดงดังรูปที่ 3-18



รูปที่ 3-18 ตัวจ่ายไฟ (Power supply)

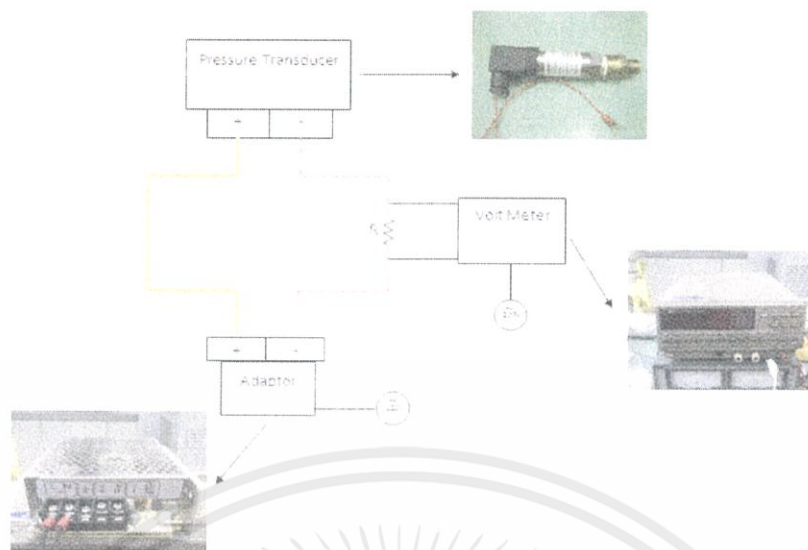
3.2 วิธีการทดลอง

3.2.1 การคาร์ริเบต

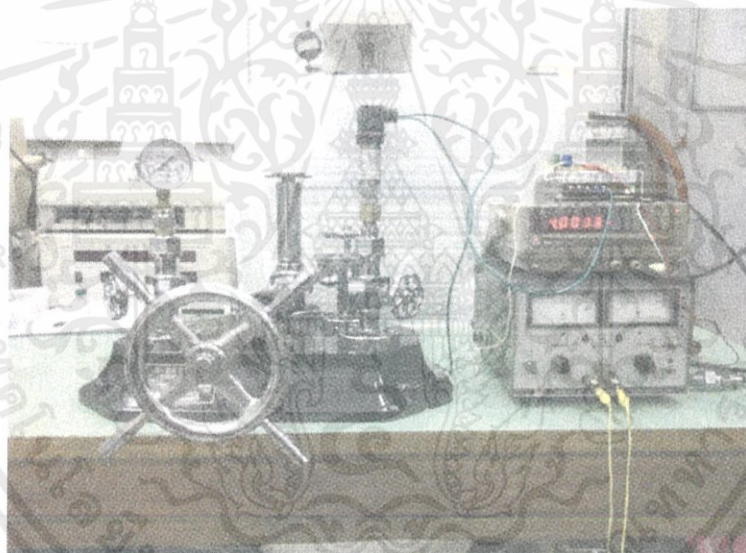
3.2.1.1 ตัวแปลงสัญญาณความดัน (Pressure transducer)

การคาร์ริเบตของตัวแปลงสัญญาณความดันเริ่มจากการเดินสาย +V ของตัวแปลงความดันต่อเข้ากับแหล่งจ่ายไฟในช่อง +V แล้วเดินสาย -V ของตัวแปลงความดันเข้ากับของตัวต้านทาน จากนั้นเดินสายจากตัวต้านทานเข้ากับแหล่งจ่ายไฟในช่อง -V และนำโวลต์มิเตอร์มาต่อค่อมระหว่างขาทั้งสองข้างของตัวต้านทาน เพื่อการอ่านค่าแล้วบันทึกผล แสดงดังรูปที่ 3-19 และรูปที่ 3-20

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3-19 แสดงวงจรสำหรับตัวแปลงสัญญาณความดัน (Pressure transducer)

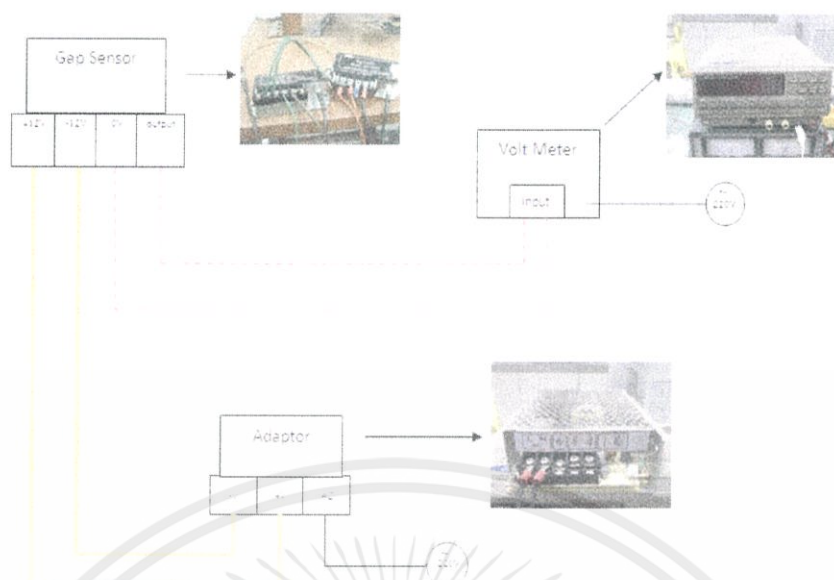


รูปที่ 3-20 แสดงการคาริเบตตัวแปลงสัญญาณความดัน (Pressure transducer)

3.2.1.2 อุปกรณ์วัดความหนาฟิล์ม (Gap sensor)

เริ่มจากการติดตั้งโพรบเข้ากับตัวรับสัญญาณ จากนั้นเดินสายเชื่อมของ Gap sensor ในช่อง -V และ +V เข้ากับช่อง -V และ +V ของแหล่งจ่ายไฟเช่นกัน แล้วทำการต่อสาย 0V และ Out put ของ Gap sensor เข้ากับ In put ของโวลต์มิเตอร์เพื่อเป็นการอ่านค่าแล้วบันทึกผล ดังแสดงในรูปที่ 3-21 และรูปที่ 3-22

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3-21 แสดงวงจรสำหรับอุปกรณ์วัดความหนาฟิล์ม (Gap sensor)

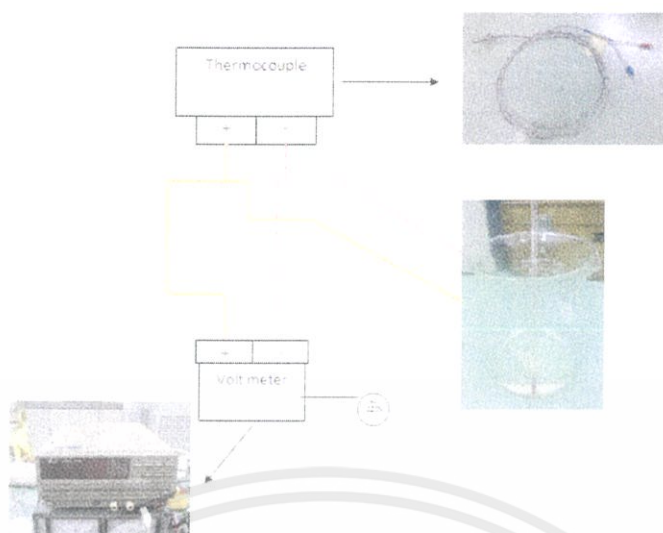


รูปที่ 3-22 แสดงการปรับเบตอุปกรณ์วัดความหนาฟิล์ม (Gap sensor)

3.2.1.3 เทอร์โมคัปเปิล (Thermocouple)

เริ่มจากการต่อสายสัญญาณ $-V$ และ $+V$ ของเทอร์โมคัปเปิล เข้าช่อง $-V$ และ $+V$ ของโวลต์มิเตอร์ ดังแสดงในรูปที่ 3.22 การปรับเบตโดยการใช้ปลายสายของเทอร์โมคัปเปิล ที่เป็นตัวรับพลังงานความร้อนจุ่มลงไปใต้น้ำร้อนที่เตรียมไว้ จากนั้นใช้เทอร์โมมิเตอร์วัดค่าอุณหภูมิในช่วงต่างๆ แล้วสังเกตค่าที่ได้จากการแปลงสัญญาณมาเป็นไฟฟ้าจะปรากฏบนโวลต์มิเตอร์ แล้วบันทึกผลดังแสดงในรูปที่ 3-23 และรูปที่ 3-24

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3-23 แสดงวงจรสำหรับเทอร์โมคัปเปิล (Thermocouple)



รูปที่ 3-24 แสดงการคาริเบตเทอร์โมคัปเปิล (Thermocouple)

3.2.2 การเปลี่ยนความถี่รอบ

เนื่องจากการมอเตอร์ที่ใช้ในการทดลองเป็นชนิดความเร็วคงที่ จึงไม่สามารถที่จะทำการเปลี่ยนความถี่รอบโดยใช้เรื่องควบคุมความเร็วได้ จึงได้ใช้วิธีการทดรอบของเพลลาโดยยึดความเร็วรอบของมอเตอร์เป็นหลัก โดยการทำให้เพลลาที่หมุนอิสระเพิ่มขึ้นใหม่ จากนั้นนำพูล์ขนาดต่างๆ ต่อเข้ากับเพลลาอิสระที่ได้ทำขึ้น ซึ่งผลที่ได้จากการทำเช่นนี้จะสามารถเปลี่ยนความถี่รอบของเพลลาได้ โดยเอกสารที่ความถี่รอบของเพลลาที่ได้จากการทดรอบนี้จะอยู่ที่ความถี่รอบเท่ากับ 95รอบต่อนาที, 222รอบต่อนาที และ 507รอบต่อนาที ตามลำดับ ดังแสดงในแสดงในรูปที่ 3-25



รูปที่ 3-25 แสดงการเปลี่ยนความเร็วรอบ

3.3 ขั้นตอนการทดลอง

- 1 ทำการปรับตั้งอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง คือ ตัวแปลงสัญญาณความดัน (Pressure transducer) อุปกรณ์วัดความหนาฟิล์ม (Gap sensor) และ เทอร์โมคัปเปิล (Thermocouple)
- 2 ติดตั้งอุปกรณ์เครื่องมือวัดเข้ากับชุดทดลอง
- 3 ปลอยน้ำมันจากถังเก็บให้ไหลเข้าไปในแบริ่ง
- 4 เปิดการทำงานของมอเตอร์โดยเปลี่ยนให้เพลามีความเร็วรอบเท่ากับ 95 รอบต่อนาที 222 รอบต่อนาที และ 507รอบต่อนาที ตามลำดับ
- 5 ทดลองความเร็วยวดยิ่งจะใส่น้ำหนักที่ใช้ถ่วงอยู่ที่ 10 กิโลกรัม 20 กิโลกรัม 30 กิโลกรัม และ 40 กิโลกรัม ตามลำดับ
- 6 บันทึกผลที่ได้จากการทดลอง ได้แก่ ค่าการกระจายความดัน ค่าการกระจายอุณหภูมิและค่าความหนาฟิล์ม
- 7 นำผลการทดลองไปวิเคราะห์เทียบกับผลการคำนวณทางทฤษฎี
- 8 สรุปผลการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

ผลการทดลอง

4.1 ผลการทดลอง

จากการทดลองแบร์ริงเพลากลมชนิดไม่เต็มวง โดยบันทึกผลของอุณหภูมิ ความดันและความหนาฟิล์ม ภายใต้ชนิดของสารหล่อลื่น ชนิด ของไหลนิวโตเนียน SAE-40 และ Soft Material ที่มีช่องว่างระหว่างผิวเพลากับการรองรับเท่ากับ 0.055 มิลลิเมตร ที่ความเร็วรอบต่างๆ ได้แก่ 95, 222 และ 507 รอบต่อนาที ที่ภาระ 10, 20, 30 และ 40 กิโลกรัม โดยใช้ อุปกรณ์แปลงสัญญาณแรงดันในการวัดความดันฟิล์ม ใช้ Gap Sensor ในการวัดความหนาฟิล์มและใช้ เทอร์โมคัปเปอร์ ในการวัดอุณหภูมิ ที่ตำแหน่งต่างๆบนกบดลงเส้น แล้วนำผลการทดลองมาวิเคราะห์ให้อยู่ในรูปแบบไร้มิติ ซึ่งสามารถนำมาสร้างเป็นกราฟเพื่อนำไปเปรียบเทียบกับผลการคำนวณทางทฤษฎีที่ได้จากการคำนวณทฤษฎีของโปรแกรมฟอร์แทรน

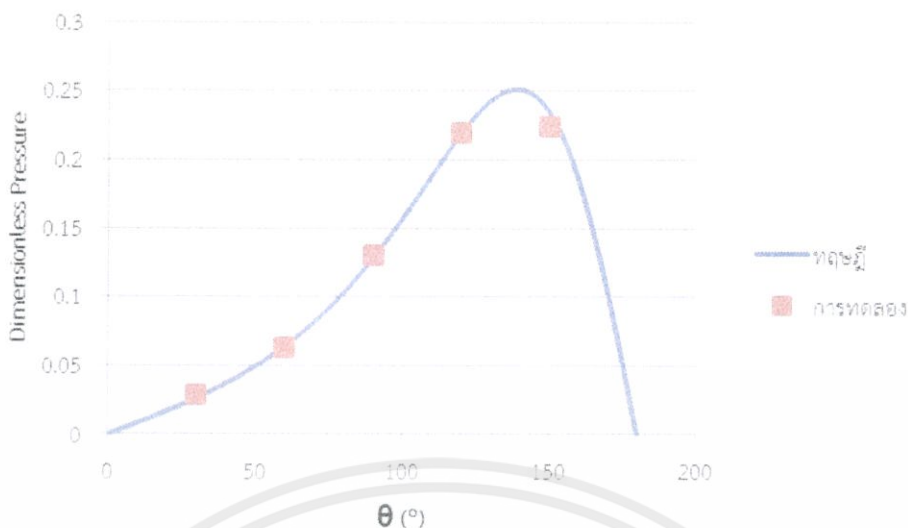
จากการคำนวณทางทฤษฎีพบว่าสามารถหาค่าอัตราส่วนความเยื้องศูนย์กลางของที่สภาวะต่างได้ดังตาราง 4.1

ตาราง 4.1 แสดงการแทนค่าที่สภาวะต่างๆของการทดลองด้วยอัตราส่วนความเยื้องศูนย์กลาง

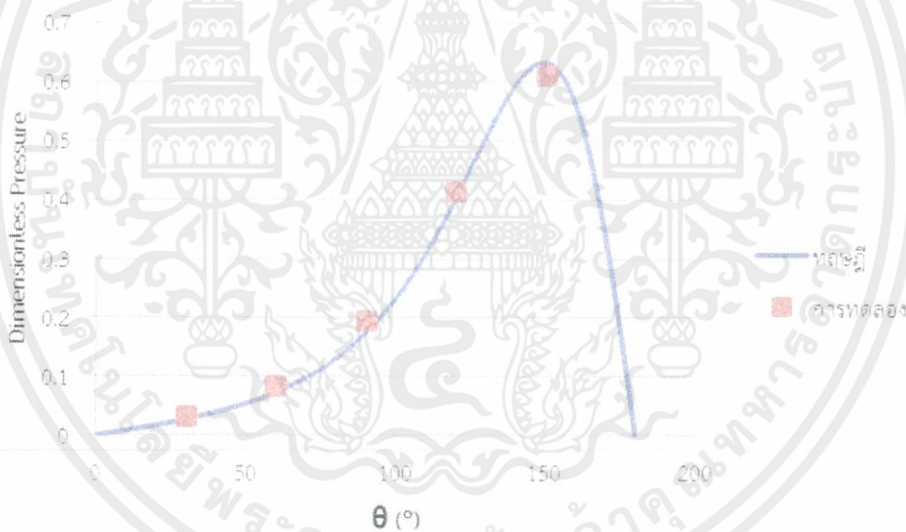
ความเร็วรอบ (รอบ/นาที)	อัตราส่วนความเยื้องศูนย์กลาง			
	น้ำหนัก 10 กก.	น้ำหนัก 20 กก.	น้ำหนัก 30 กก.	น้ำหนัก 40 กก.
95	0.407	0.558	0.633	0.68
222	0.226	0.372	0.464	0.526
507	0.107	0.202	0.279	0.342

เมื่อนำกราฟการกระจายความดันและอุณหภูมิภายในฟิล์มน้ำมันของแบร์ริงเพลากลมชนิดไม่เต็มวงที่มีความยืดหยุ่นและกราฟจากการคำนวณทางทฤษฎีภายใต้ค่าอัตราส่วนความเยื้องศูนย์กลางเดียวกันมาเปรียบเทียบ จะได้กราฟที่สภาวะต่างๆดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

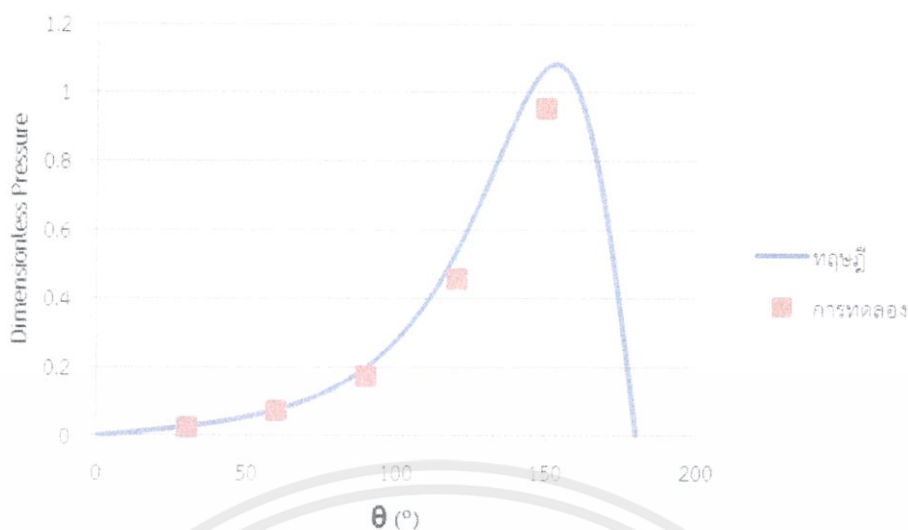


รูปที่ 4-1 กราฟการกระจายแรงดัน แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ความดันในหน่วยไร้มิติและมุมของแบริงที่ความเร็วรอบ 95รอบต่อนาที และภาระ 10 กิโลกรัม (อัตราส่วนความเยื้องศูนย์กลาง=0.407)



รูปที่ 4-2 กราฟการกระจายแรงดัน แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ความดันในหน่วยไร้มิติและมุมของแบริงที่ความเร็วรอบ 95รอบต่อนาที และภาระ 20 กิโลกรัม (อัตราส่วนความเยื้องศูนย์กลาง=0.558)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

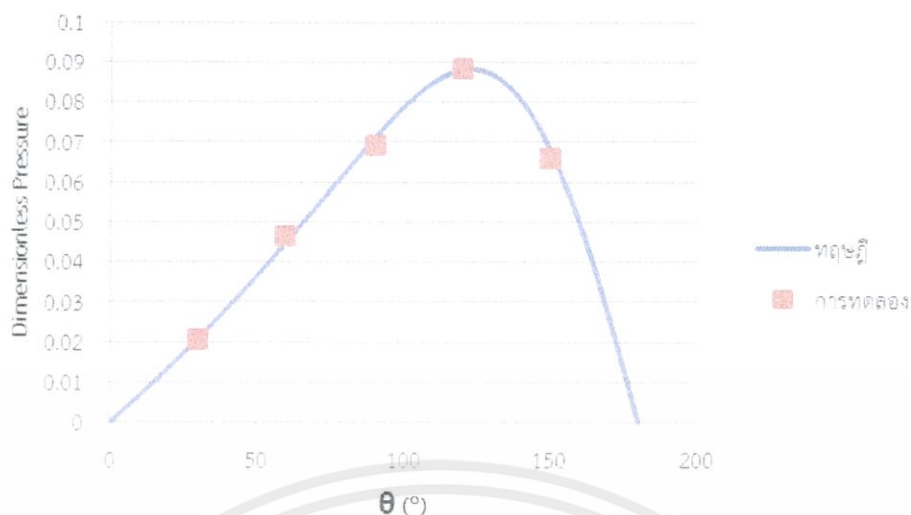


รูปที่ 4-3 กราฟการกระจายแรงดัน แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ความดันในหน่วยไร้มิติและมุมของแบริงที่ความเร็วรอบ 95รอบต่อนาที และภาระ 30 กิโลกรัม (อัตราส่วนความเยื้องศูนย์กลาง=0.633)



รูปที่ 4-4 กราฟการกระจายแรงดัน แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ความดันในหน่วยไร้มิติและมุมของแบริงที่ความเร็วรอบ 95รอบต่อนาที และภาระ 40 กิโลกรัม (อัตราส่วนความเยื้องศูนย์กลาง=0.68)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

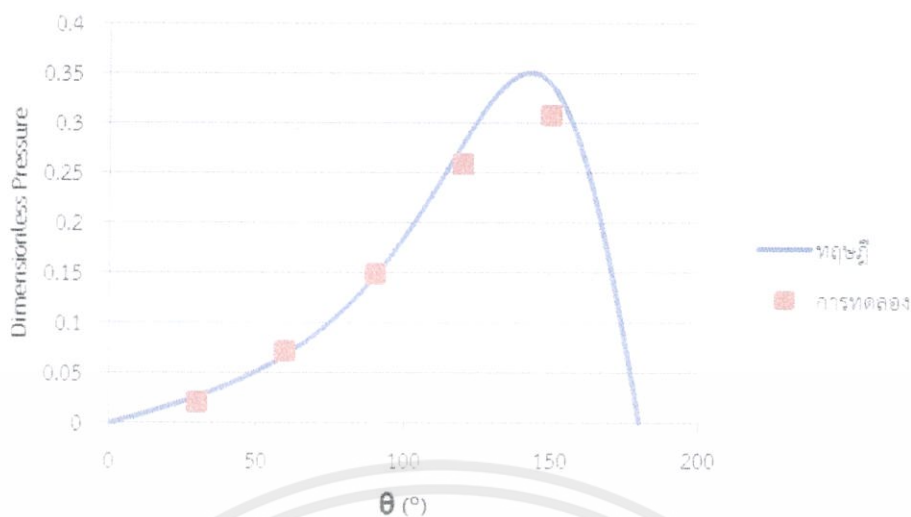


รูปที่ 4-5 กราฟการกระจายแรงดัน แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ความดันในหน่วยไร้มิติและมุมของแบริงที่ความเร็วรอบ 222 รอบต่อนาที และภาระ 10 กิโลกรัม (อัตราส่วนความเยื้องศูนย์กลาง=0.226)

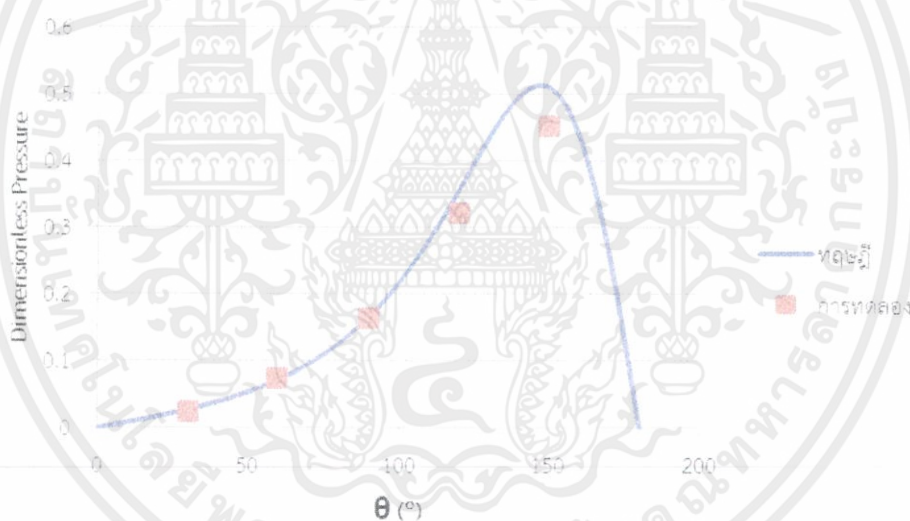


รูปที่ 4-6 กราฟการกระจายแรงดัน แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ความดันในหน่วยไร้มิติและมุมของแบริงที่ความเร็วรอบ 222 รอบต่อนาที และภาระ 20 กิโลกรัม (อัตราส่วนความเยื้องศูนย์กลาง=0.372)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

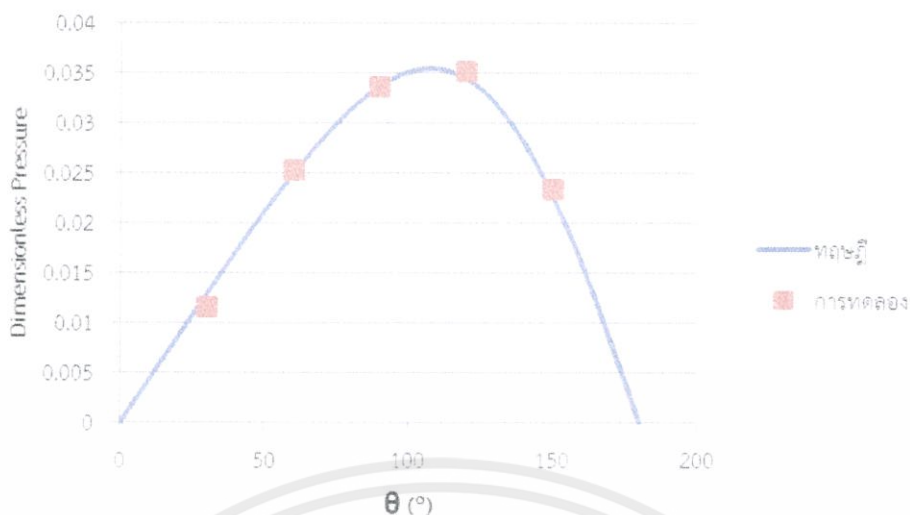


รูปที่ 4-7 กราฟการกระจายแรงดัน แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ความดันในหน่วยไร้มิติและมุมของแบริงที่ความเร็วรอบ 222รอบต่อนาที และภาระ 30กิโลกรัม (อัตราส่วนความเยื้องศูนย์กลาง=0.464)



รูปที่ 4-8 กราฟการกระจายแรงดัน แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ความดันในหน่วยไร้มิติและมุมของแบริงที่ความเร็วรอบ 222รอบต่อนาที และภาระ 40กิโลกรัม (อัตราส่วนความเยื้องศูนย์กลาง=0.526)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

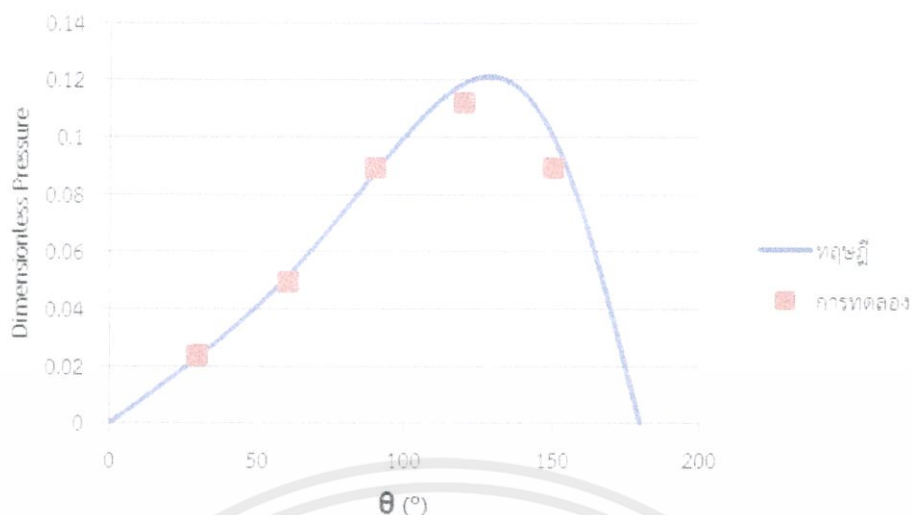


รูปที่ 4-9 กราฟการกระจายแรงดัน แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ความดันในหน่วยไร้มิติและมุมของแบริ่งที่ความเร็วรอบ 507รอบต่อนาที และภาระ 10กิโลกรัม (อัตราส่วนความเยื้องศูนย์กลาง=0.107)



รูปที่ 4-10 กราฟการกระจายแรงดัน แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ความดันในหน่วยไร้มิติและมุมของแบริ่งที่ความเร็วรอบ 507รอบต่อนาที และภาระ 20กิโลกรัม (อัตราส่วนความเยื้องศูนย์กลาง=0.202)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

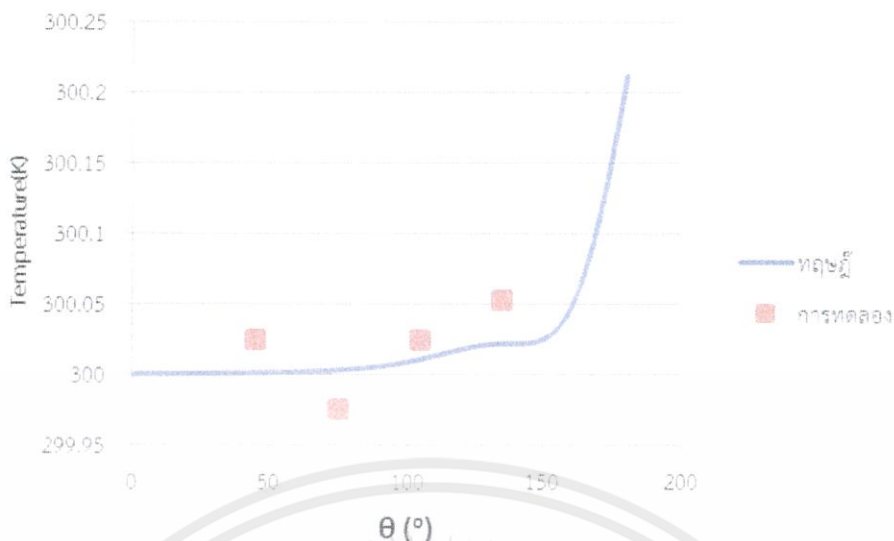


รูปที่ 4-11 กราฟการกระจายแรงดัน แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ความดันในหน่วยไร้มิติและมุมของ แบร์ริงที่ความเร็วรอบ 507รอบต่อนาที และภาระ 30กิโลกรัม (อัตราส่วนความเยื้องศูนย์กลาง=0.279)

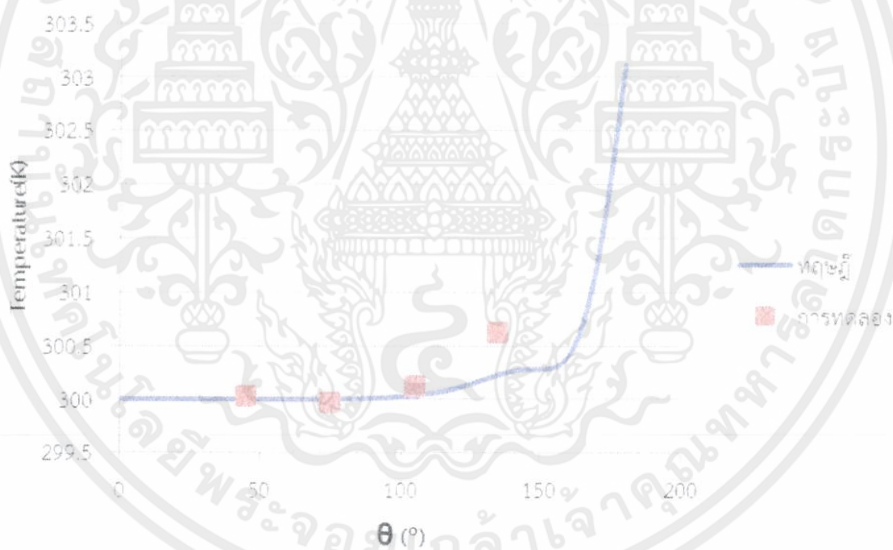


รูปที่ 4-12 กราฟการกระจายแรงดัน แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ความดันในหน่วยไร้มิติและมุมของ แบร์ริงที่ความเร็วรอบ 507รอบต่อนาที และภาระ 40กิโลกรัม (อัตราส่วนความเยื้องศูนย์กลาง=0.342)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะโดยปริยายหรือโดยชัดแจ้ง หากมีข้อผิดพลาดประการใด ขออภัยเป็นอย่างสูง และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

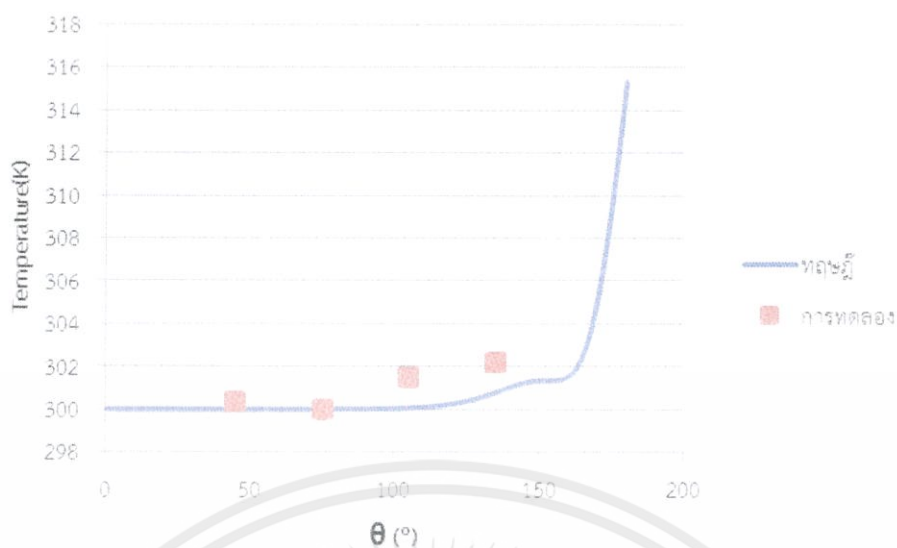


รูปที่ 4-13 กราฟการกระจายอุณหภูมิ แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง อุณหภูมิในเคลวินและมุมของ แบ็งก์ที่ความเร็วรอบ 95รอบต่อนาที และภาระ 10กิโลกรัม (อัตราส่วนความเยื้องศูนย์กลาง=0.407)

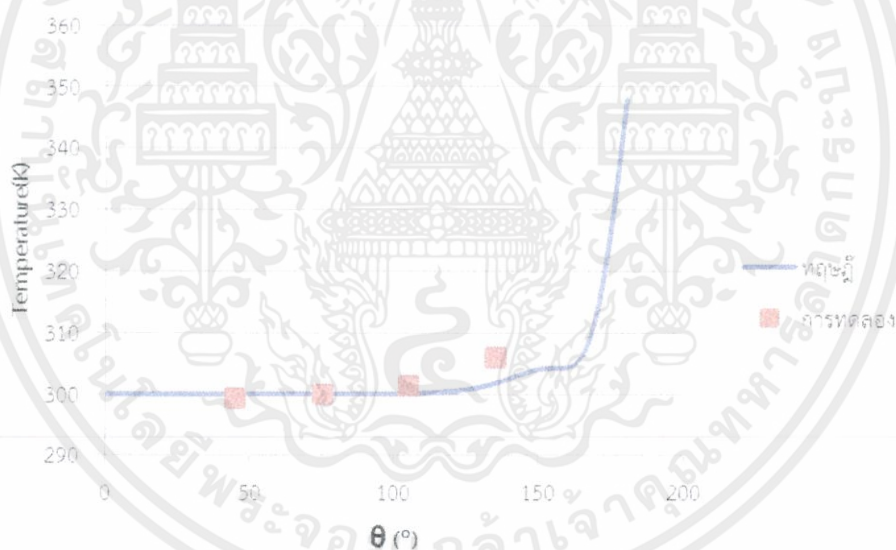


รูปที่ 4-14 กราฟการกระจายอุณหภูมิ แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง อุณหภูมิในเคลวินและมุมของ แบ็งก์ที่ความเร็วรอบ 95รอบต่อนาที และภาระ 20กิโลกรัม (อัตราส่วนความเยื้องศูนย์กลาง=0.558)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

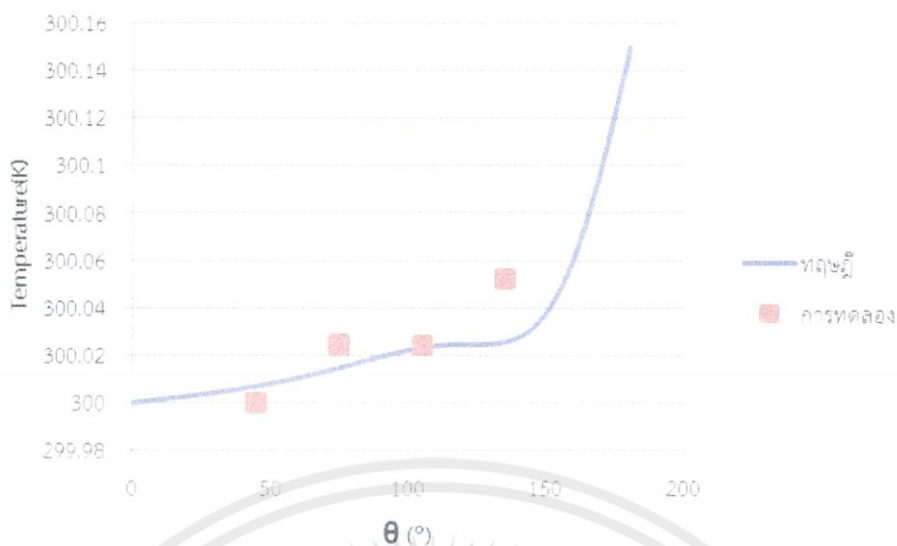


รูปที่ 4-15 กราฟการกระจายอุณหภูมิ แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง อุณหภูมิในเคลวินและมุมของ แบร์ริงที่ความเร็วรอบ 95รอบต่อนาที และภาระ 30กิโลกรัม (อัตราส่วนความเยื้องศูนย์กลาง=0.633)

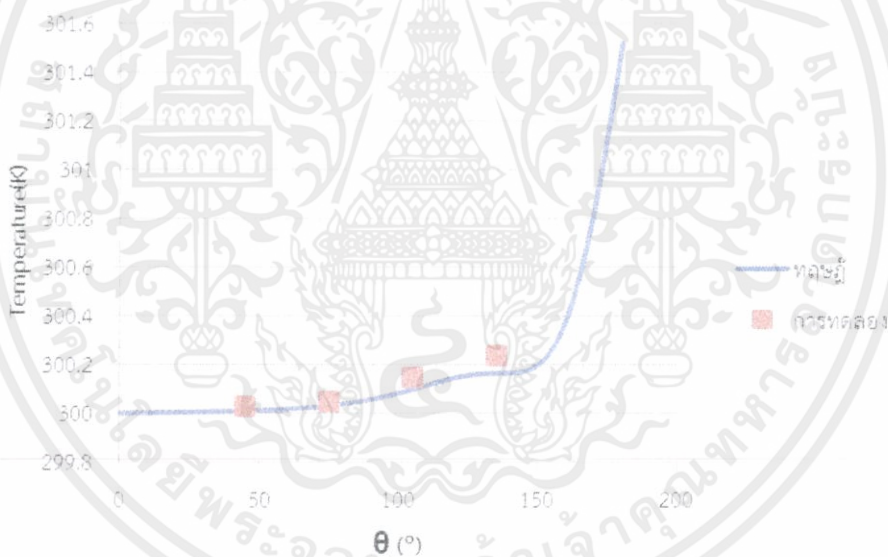


รูปที่ 4-16 กราฟการกระจายอุณหภูมิ แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง อุณหภูมิในเคลวินและมุมของ แบร์ริงที่ความเร็วรอบ 95รอบต่อนาที และภาระ 40กิโลกรัม (อัตราส่วนความเยื้องศูนย์กลาง=0.68)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

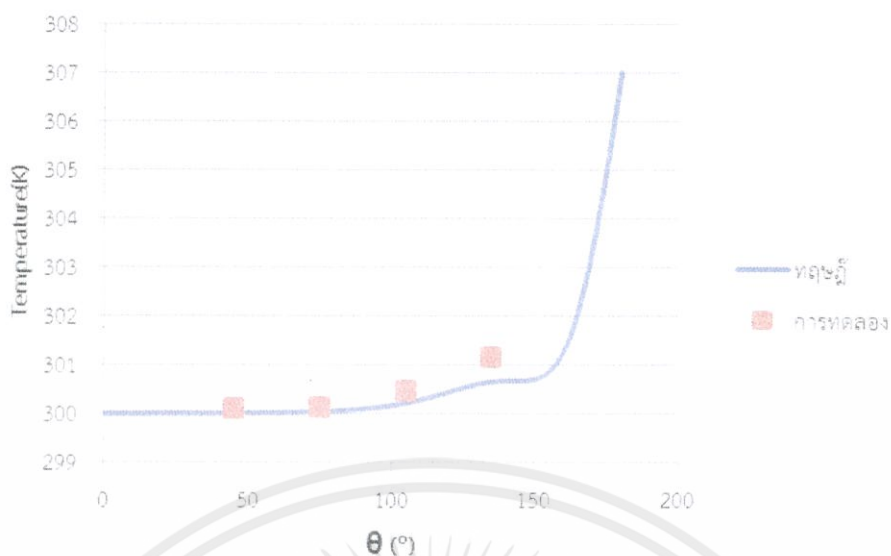


รูปที่ 4-17 กราฟการกระจายอุณหภูมิ แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง อุณหภูมิในเคลวินและมุมของ แบร์ริงที่ความเร็วรอบ 222รอบต่ออนาที และภาระ 10กิโลกรัม (อัตราส่วนความเยื้องศูนย์กลาง=0.226)



รูปที่ 4-18 กราฟการกระจายอุณหภูมิ แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง อุณหภูมิในเคลวินและมุมของ แบร์ริงที่ความเร็วรอบ 222รอบต่ออนาที และภาระ 20กิโลกรัม (อัตราส่วนความเยื้องศูนย์กลาง=0.372)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4-19 กราฟการกระจายอุณหภูมิ แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง อุณหภูมิในเคลวินและมุมของ แบริงที่ความเร็วรอบ 222รอบต่อนาที และภาระ 30กิโลกรัม (อัตราส่วนความเยื้องศูนย์กลาง=0.464)



รูปที่ 4-20 กราฟการกระจายอุณหภูมิ แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง อุณหภูมิในเคลวินและมุมของ แบริงที่ความเร็วรอบ 222รอบต่อนาที และภาระ 40กิโลกรัม (อัตราส่วนความเยื้องศูนย์กลาง=0.526)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

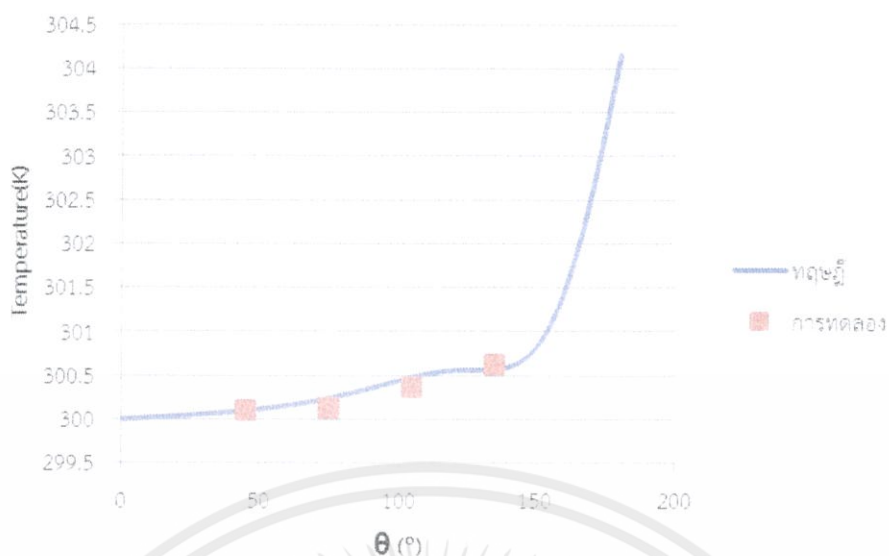


รูปที่ 4-21 กราฟการกระจายอุณหภูมิต่ออุณหภูมิ แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง อุณหภูมิในเคลวินและมุมของ แบร์ริงที่ความเร็วรอบ 507รอบต่อนาที และภาระ 10กิโลกรัม (อัตราส่วนความเยื้องศูนย์กลาง=0.107)

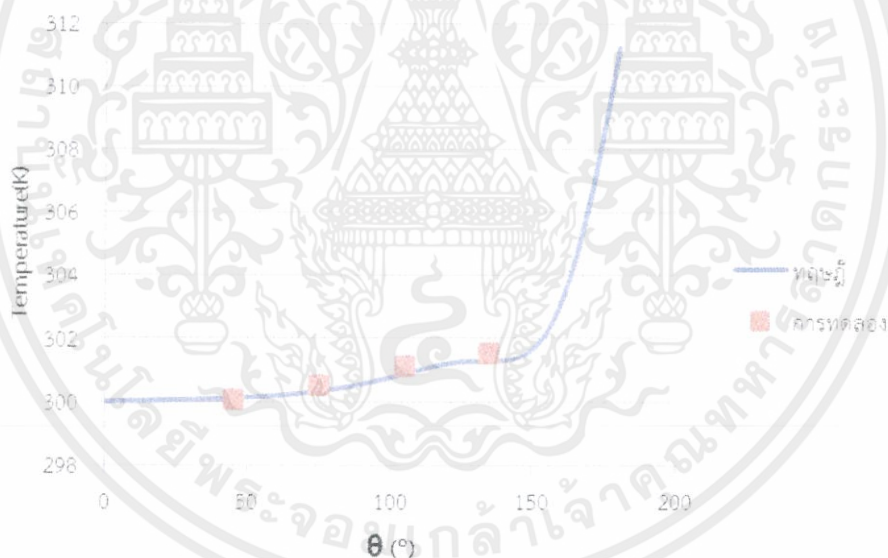


รูปที่ 4-22 กราฟการกระจายอุณหภูมิต่ออุณหภูมิ แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง อุณหภูมิในเคลวินและมุมของ แบร์ริงที่ความเร็วรอบ 507รอบต่อนาที และภาระ 20กิโลกรัม (อัตราส่วนความเยื้องศูนย์กลาง=0.202)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4-23 กราฟการกระจายอุณหภูมิ แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง อุณหภูมิในเคลวินและมุมของ แบร็งที่ความเร็วรอบ 507รอบต่ออนาที และภาระ 30กิโลกรัม (อัตราส่วนความเยื้องศูนย์กลาง=0.279)



รูปที่ 4-24 กราฟการกระจายอุณหภูมิ แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง อุณหภูมิในเคลวินและมุมของ แบร็งที่ความเร็วรอบ 507รอบต่ออนาที และภาระ 40กิโลกรัม (อัตราส่วนความเยื้องศูนย์กลาง=0.342)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2 วิจารณ์ผลการทดลอง

จากกราฟ รูปที่ 4-1 ถึงรูปที่ 4-12 เป็นกราฟการกระจายแรงดันที่อัตราส่วนความเยื้องศูนย์กลางต่างๆ ซึ่งได้แสดงความสัมพันธ์ระหว่างผลที่ได้จากการคำนวณทางทฤษฎีเปรียบเทียบกับผลที่ได้จริงจากการทดลองซึ่งจากกราฟการกระจายแรงดันนั้นสามารถจำแนกการอธิบายออกเป็นสองส่วนตามค่าอัตราส่วนความเยื้องศูนย์กลางได้แก่ ที่อัตราส่วนความเยื้องศูนย์กลางมีค่าต่ำ และ ที่อัตราส่วนความเยื้องศูนย์กลางมีค่ามาก

ส่วนแรกคือส่วนที่มีอัตราส่วนความเยื้องศูนย์กลางต่ำ ได้แก่ กราฟรูปที่ 4-1, 4-5, 4-6, 4-9 และ 4-10 ซึ่งพบว่าผลที่ได้จริงจากการทดลองมีค่าใกล้เคียงกับการทำนายผลด้วยการคำนวณทางทฤษฎี ทำให้เห็นว่าการใช้วัสดุที่มีความยืดหยุ่นมาทำแบริ่งไม่ส่งผลกระทบต่อผลของการกระจายแรงดัน หรือสามารถสรุปได้ว่า ที่อัตราส่วนความเยื้องศูนย์กลางนั้นไม่ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนรูปของวัสดุที่มีความยืดหยุ่นที่นำมาทำแบริ่ง

ส่วนที่สองคือส่วนที่มีอัตราส่วนความเยื้องศูนย์กลางสูง ได้แก่ กราฟรูปที่ 4-2 – 4-4, 4-7, 4-8, 4-11 และ 4-12 ซึ่งพบว่าผลที่ได้จริงจากการทดลองมีค่าต่ำกว่าการทำนายผลด้วยการคำนวณทางทฤษฎี ทำให้เห็นว่าการใช้วัสดุที่มีความยืดหยุ่นมาทำแบริ่งส่งผลกระทบต่อผลของการกระจายแรงดัน หรือสามารถสรุปได้ว่าที่อัตราส่วนความเยื้องศูนย์กลางสูงส่งผลให้มีการเปลี่ยนรูปของวัสดุที่มีความยืดหยุ่นที่นำมาทำแบริ่ง โดยการเปลี่ยนรูปของวัสดุที่มีความยืดหยุ่นนั้นส่งผลให้พื้นที่ที่สัมผัสกับสารหล่อลื่นมีค่ามากขึ้น ซึ่งเป็นเหตุทำให้จุดพื้นที่ในการรับแรงมากขึ้น และ แรงบนจุดพื้นที่แต่ละจุดก็มีค่าน้อยลง

จากกราฟ รูปที่ 4-13 ถึงรูปที่ 4-24 เป็นกราฟการกระจายอุณหภูมิที่อัตราส่วนความเยื้องศูนย์กลางต่างๆ ซึ่งได้แสดงความสัมพันธ์ระหว่างผลที่ได้จากการคำนวณทางทฤษฎีเปรียบเทียบกับผลที่ได้จริงจากการทดลองซึ่งจากกราฟการกระจายอุณหภูมิ นั้นสามารถจำแนกการอธิบายออกเป็นสามส่วนตามค่าอัตราส่วนความเยื้องศูนย์กลางและข้อจำกัดของอุปกรณ์ในการวัดค่าอุณหภูมิ ได้แก่ ที่อัตราส่วนความเยื้องศูนย์กลางมีค่าต่ำที่และอุปกรณ์วัดไม่สามารถใช้ได้, ที่อัตราส่วนความเยื้องศูนย์กลางมีค่าต่ำและอุปกรณ์วัดสามารถใช้ได้ และส่วนสุดท้ายคือ ที่อัตราส่วนความเยื้องศูนย์กลางมีค่ามาก

ส่วนแรกคือที่อัตราส่วนความเยื้องศูนย์กลางมีค่าต่ำที่และอุปกรณ์วัดไม่สามารถใช้ได้ ได้แก่ กราฟรูปที่ 4-13, 4-17 และ 4-21 เนื่องจากข้อจำกัดของอุปกรณ์ในการวัดทำให้ไม่สามารถวัดอุณหภูมิที่มีเลขนัยสำคัญมากเท่ากับการคำนวณได้

ส่วนที่สองคือที่อัตราส่วนความเยื้องศูนย์กลางมีค่าต่ำและอุปกรณ์วัดสามารถใช้ได้ ได้แก่ กราฟรูปที่ 4-22 และ 4-23 ซึ่งพบว่าผลที่ได้จริงจากการทดลองจะมีค่าต่ำกว่าผลที่ได้จากการคำนวณ ซึ่งอธิบายได้ด้วยสมการพลังงานที่ใช้เป็นแบบแอดเดียแบติกมาใช้ในการวิเคราะห์ทำให้ผลที่ได้จากการคำนวณเป็นอุณหภูมิสูงสุด แสดงให้เห็นว่าการเปลี่ยนรูปของวัสดุที่มีความยืดหยุ่นที่ใช้ทำแบริ่งมีผลน้อยหรืออาจจะไม่มีผลต่อการกระจายอุณหภูมิ

ส่วนที่สามคือส่วนที่อัตราส่วนความเยื้องศูนย์กลางมีค่ามาก ได้แก่ กราฟรูปที่ 4-14 – 4-16, 4-18 – 4-20 และ 4-24 พบว่าผลที่ได้จริงจากการทดลองจะมีค่าสูงกว่าผลที่ได้จากการคำนวณ นั้นหมายความว่าอุณหภูมิจากการทดลองสูงกว่าอุณหภูมิสูงสุดจากการคำนวณ ซึ่งอธิบายปรากฏการณ์นี้โดยเริ่มจากการเปลี่ยนแปลงของวัสดุที่มีความยืดหยุ่น ทำให้ความหนาฟิล์มมีค่ามากขึ้น แล้วส่งผลให้สัมประสิทธิ์แรงเสียดทานมีค่าสูงขึ้น ซึ่งการที่สัมประสิทธิ์แรงเสียดทานมีค่าสูงขึ้นทำให้อุณหภูมิมีค่าสูงขึ้นเช่นกัน ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่าที่อัตราส่วนความเยื้องศูนย์กลางมีค่ามากทำให้เกิดการเปลี่ยนรูปของวัสดุที่มีความยืดหยุ่นที่ใช้ทำแบริ่งและส่งผลให้อุณหภูมิมีค่าสูงขึ้นด้วย

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

- 1 การใช้วัสดุที่มีความยืดหยุ่นมาทำแบริ่งไม่ส่งผลกระทบต่อผลของการกระจายแรงดันที่อัตราส่วนความเยื้องศูนย์กลางต่ำ แต่ส่งผลกระทบต่อผลของการกระจายแรงดันที่อัตราส่วนความเยื้องศูนย์กลางสูง
- 2 ข้อจำกัดของอุปกรณ์ในการวัดทำให้ไม่สามารถวัดอุณหภูมิที่มีเลขนัยสำคัญมากเท่ากับการคำนวณได้ ดังนั้นอุปกรณ์วัดจึงไม่สามารถใช้ได้ที่อัตราความเยื้องศูนย์กลางต่ำ
- 3 ผลที่ได้จากการทดลองของการกระจายอุณหภูมิจะมีค่าต่ำกว่าผลที่ได้จากการคำนวณ ดังนั้นการเปลี่ยนรูปของวัสดุที่มีความยืดหยุ่นที่ใช้ทำแบริ่งมีผลน้อยหรืออาจไม่มีผลต่อการกระจายอุณหภูมิเลย
- 4 ที่อัตราความเยื้องศูนย์กลางสูงการเปลี่ยนแปลงของวัสดุที่มีความยืดหยุ่น ทำให้ความหนาฟิล์มมีค่ามากขึ้น ส่งผลให้สัมประสิทธิ์แรงเสียดทานมีค่าสูงขึ้น ทำให้อุณหภูมิมีค่าสูงขึ้นเช่นกัน
- 5 การสร้างชุดการทดลอง ทำการทดลอง และบันทึกผลจากการลงมือทำงานจริง ทำให้พบปัญหาต่างๆที่เกิดขึ้นจากการปฏิบัติงาน

5.2 ข้อเสนอแนะ

- 1 ควรใช้เทอร์โมคัปเปิลซึ่งเป็นเครื่องมือในการวัดอุณหภูมิที่มีความละเอียดมากขึ้น
- 2 ควรติดตั้งเซนเซอร์วัดอุณหภูมิของสารหล่อลื่นในบริเวณที่สารหล่อลื่นเข้าไปในแบริ่ง
- 3 ควรมีการควบคุมอุณหภูมิของสารหล่อลื่นก่อนเข้าไปในแบริ่งและเพิ่มขนาดของถังบรรจุสารหล่อลื่น
- 4 ก่อนการทดลองควรมีการตรวจสอบวัสดุที่มีความยืดหยุ่นที่ใช้ในการทำแบริ่งทุกครั้งเพราะอาจเกิดการเสียรูปของวัสดุก่อนทำการทดลองได้
- 5 ขณะเริ่มการทดลองควรเปิดมอเตอร์และใส่สารหล่อลื่นเพื่อให้เพลลาหมุนก่อนใส่ก้อนน้ำหนักเพื่อไม่ให้เกิดการเสียดสี
- 6 ควรมีภาชนะในการรองรับสารหล่อลื่นที่ไหลออกมาจากแบริ่งเพื่อป้องกันการรั่วไหลของสารหล่อลื่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บรรณานุกรม

- [1] ผศ.ดร.มงคล มงคลวงโรจน์ และศ.ดร.อิโรมุ ฮาชิโมโตะ. 2536. **ทฤษฎีการหล่อลื่น**. ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล KMITL.
- [2] มนตรี พิรุณเกษตร. 2552. **กลศาสตร์ของไทย**. กรุงเทพฯ : วิทยพัฒน์
- [3] พุทธิชัย แสงวิโรจน์ และคณะ. 2543. การศึกษาสมรรถนะการหล่อลื่นด้วยน้ำมันพืชของแบริ่งเพลลากลม. ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล KMITL
- [4] H. Hashimoto and M. Mongkolwongrojn. **Adiabatic Approximate Solution for Static and Dynamic Characteristics of Turbulent Partial Journal Bearing with Surface Roughnes**, inc.1994.
- [5] Dr.Hiromu HASHIMOTO and Dr.Mongkol MONGKOLWONGROJN. **Advanced Lubrication Theory**. ภาควิชาเครื่องกล KMITL, inc.1993



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



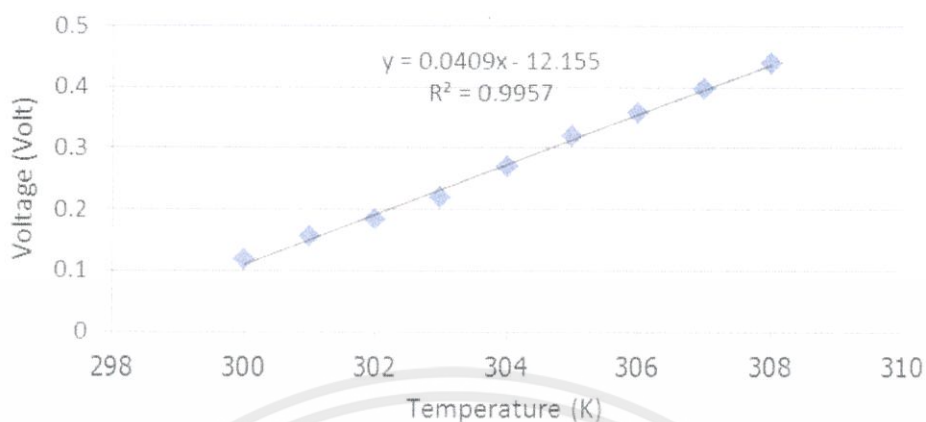
ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

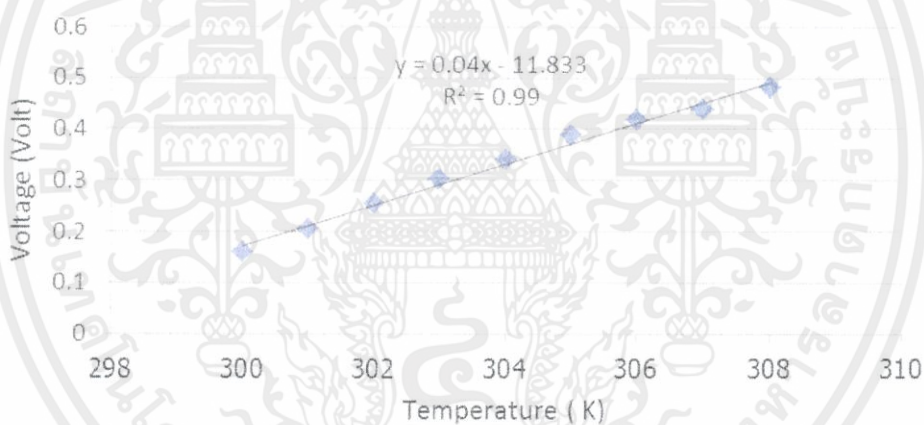


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Calibration curve for thermocouple 1

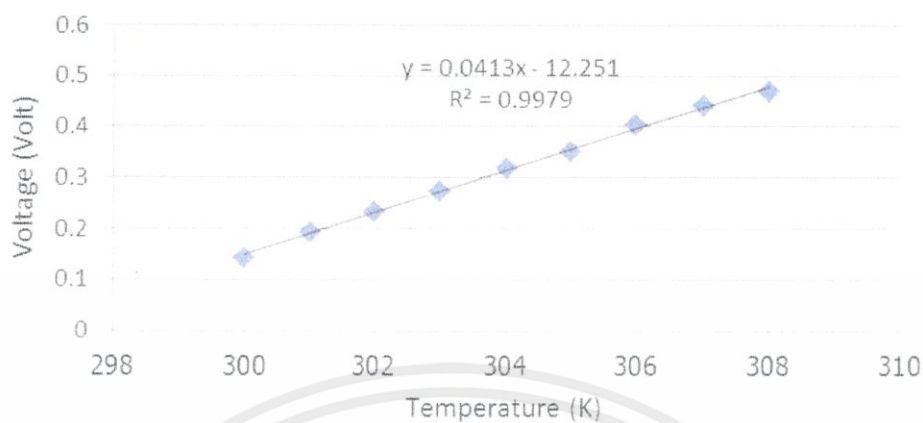


Calibration curve for thermocouple 2

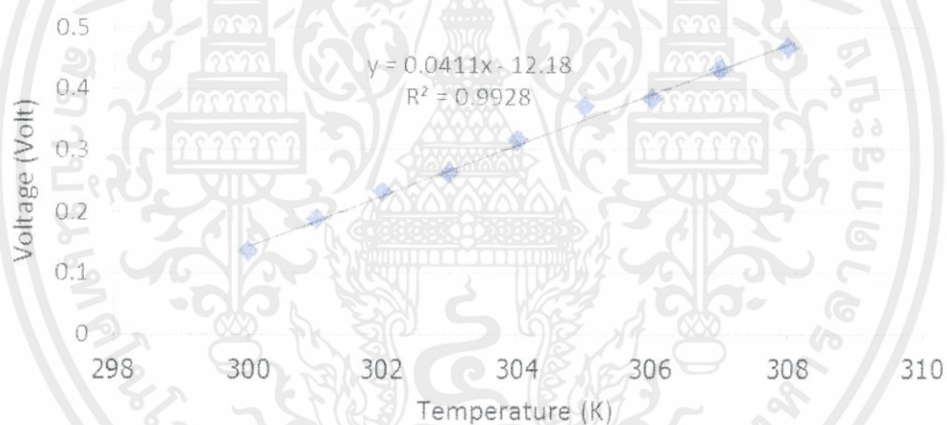


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Calibration curve for thermocouple 3

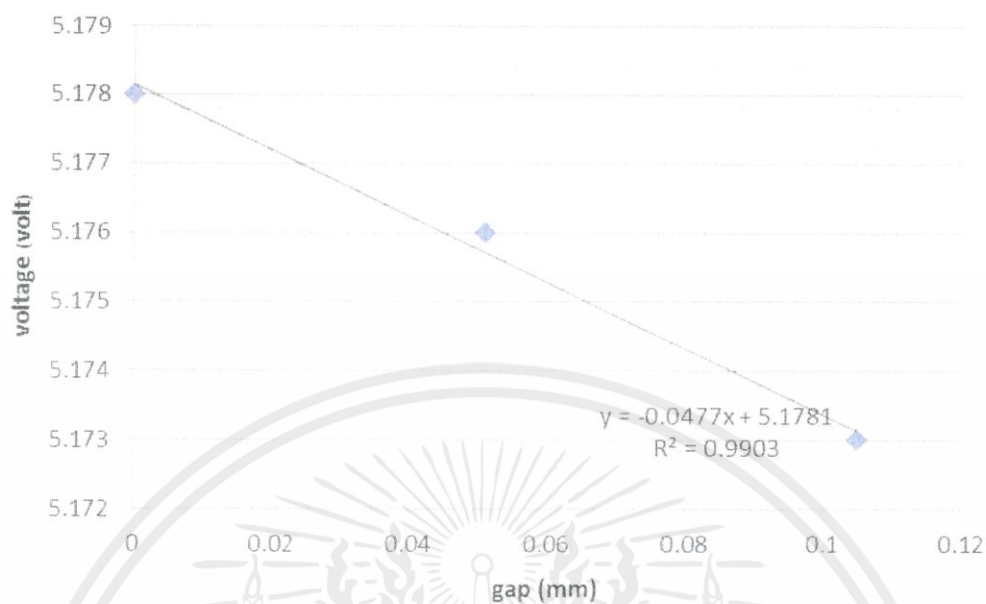


Calibration curve for thermocouple 4

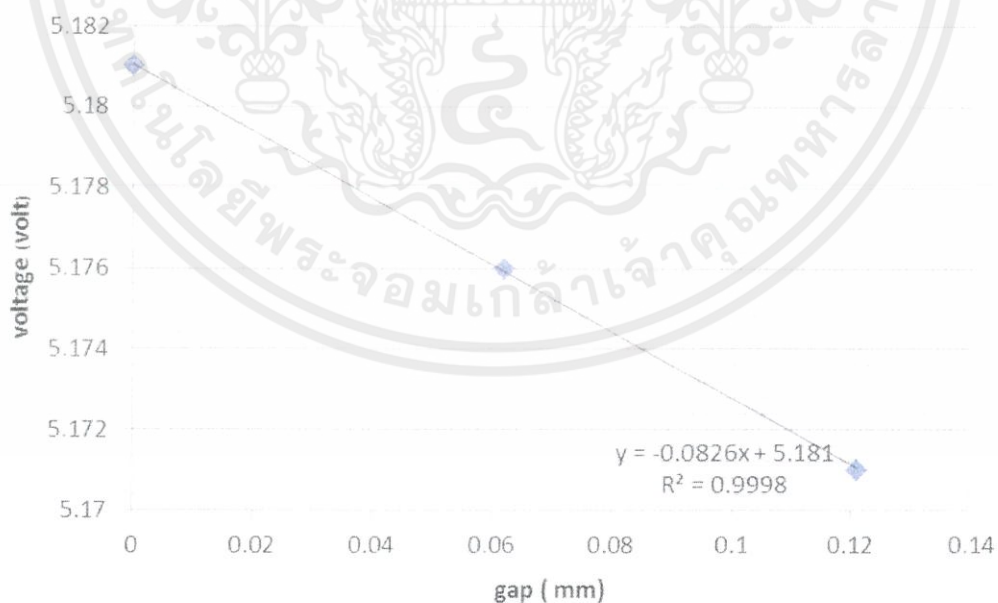


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Calibration curve for gap sensor 1

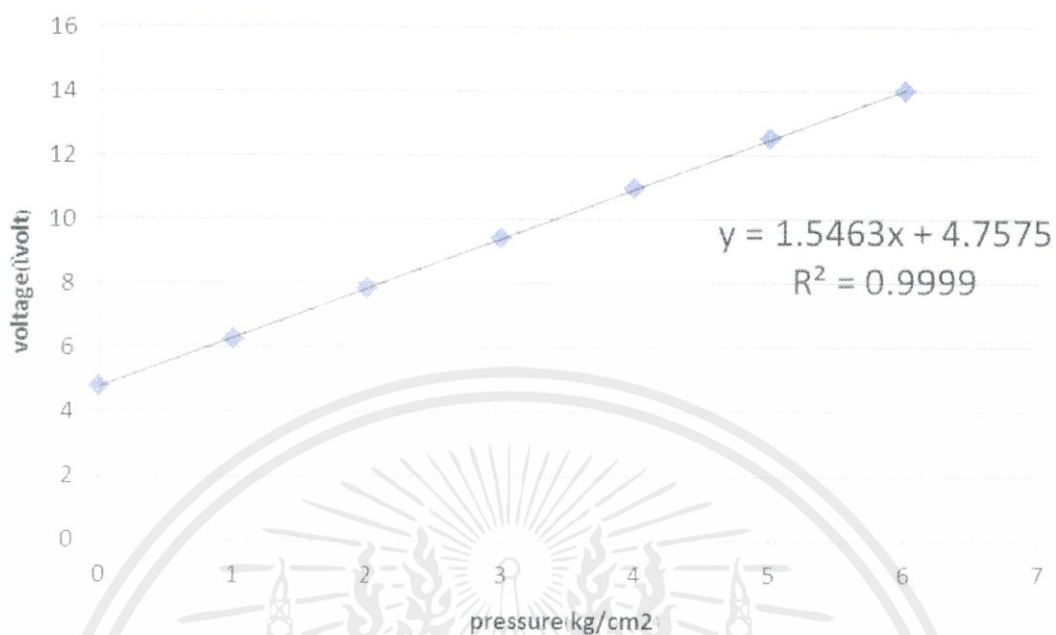


Calibration curve for gap sensor 2



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Calibration curve for pressure transducer



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางแสดงผลการทดลองการกระจายแรงดันที่สภาวะต่างๆที่ความเร็วรอบ 95 รอบต่อนาที

Load	ϵ	Pressure1	Pressure2	Pressure3	Pressure4	Pressure5
10	0.407	0.028256857	0.06267226	0.129691729	0.219896311	0.224424654
20	0.558	0.032241799	0.083321502	0.193994192	0.411173498	0.610420568
30	0.633	0.022279445	0.07245348	0.171714747	0.456638057	0.950951923
40	0.68	0.025177584	0.065932667	0.153963645	0.508804562	1.288947407

ตารางแสดงผลการทดลองการกระจายแรงดันที่สภาวะต่างๆที่ความเร็วรอบ 222 รอบต่อนาที

Load	ϵ	Pressure1	Pressure2	Pressure3	Pressure4	Pressure5
10	0.226	0.020649242	0.046499608	0.069322454	0.08849675	0.065829162
20	0.372	0.026083253	0.063112156	0.119004841	0.185920805	0.174664639
30	0.464	0.020959757	0.071884203	0.148581386	0.258503666	0.307254507
40	0.526	0.023055732	0.072427604	0.164262389	0.320839535	0.452187343

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางแสดงผลการทดลองการกระจายแรงดันที่สภาวะต่างๆที่ความเร็วรอบ 507 รอบต่อนาที

Load	ϵ	Pressure1	Pressure2	Pressure3	Pressure4	Pressure5
10	0.107	0.011581236	0.025268151	0.03358898	0.035117296	0.023298322
20	0.202	0.018203937	0.041128671	0.061030736	0.075668603	0.058721281
30	0.279	0.023977573	0.04931365	0.089083818	0.112042514	0.089015893
40	0.342	0.023875686	0.055698613	0.105012262	0.151812682	0.137480478

ตารางแสดงผลการทดลองการกระจายอุณหภูมิที่สภาวะต่างๆที่ความเร็วรอบ 95 รอบต่อนาที

Load	ϵ	Temp 1	Temp 2	Temp 3	Temp 4
10	0.407	300.02421	299.975	300.02433	300.05208
20	0.558	300.02421	299.975	300.12165	300.625
30	0.633	300.3632	300	301.48418	302.21354
40	0.68	299.29782	300	301.43552	305.88542

ตารางแสดงผลการทดลองการกระจายอุณหภูมิที่สภาวะต่างๆที่ความเร็วรอบ 222 รอบต่อนาที

Load	ϵ	Temp 1	Temp 2	Temp 3	Temp 4
10	0.226	300	300.025	300.02433	300.05208
20	0.372	300.02421	300.05	300.14599	300.23438
30	0.464	300.09685	300.125	300.48662	301.14583
40	0.526	299.78208	300.2	301.11922	302.52604

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษานั้น ไม่ควรเอาไปทำประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางแสดงผลการทดลองการกระจายอุณหภูมิที่สภาวะต่างๆที่ความเร็วรอบ 507 รอบต่อนาที

Load	ε	Temp 1	Temp 2	Temp 3	Temp 4
10	0.107	300.04843	300.05	300.04866	300.10417
20	0.202	300.09685	300.125	300.19465	300.33854
30	0.279	300.09685	300.125	300.36496	300.625
40	0.342	300.07264	300.5	301.11922	301.53646



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางแสดงผลการคำนวณการกระจายแรงดันที่สภาวะต่างๆที่ความเร็วรอบ 95 รอบต่อนาที

Theta	ε			
	0.407	0.558	0.633	0.68
0	0	0	0	0
2.022472	0.00162913	0.00164506	0.00162104	0.0015996
4.044944	0.0032799	0.00332681	0.00328609	0.00324777
6.067416	0.00493659	0.00501728	0.004961	0.00490642
8.089888	0.00660275	0.00672103	0.00665053	0.00658039
10.11236	0.00828163	0.00844267	0.00835981	0.00827504
12.13483	0.00997648	0.01018684	0.01009399	0.00999581
14.1573	0.01195829	0.01195829	0.01185837	0.01174829
16.17978	0.01342729	0.0137619	0.01365842	0.01353826
18.20225	0.01518996	0.01560269	0.01549981	0.01537172
20.22472	0.01698204	0.01748586	0.01738842	0.01725494
22.24719	0.01880705	0.01941678	0.0193304	0.01919451
24.26966	0.02066857	0.02140106	0.02133222	0.02119735
26.29213	0.02257026	0.02344458	0.02340065	0.02327076
28.31461	0.02451589	0.02555343	0.02554287	0.0254225
30.33708	0.02650929	0.02773408	0.02776645	0.02766083
32.35955	0.0285544	0.02999326	0.03007944	0.02999453
34.38202	0.03065526	0.03233812	0.03249041	0.03243302
36.40449	0.03281603	0.03477615	0.03500847	0.03498636
38.42697	0.03504096	0.03731532	0.03764337	0.0376654
40.44944	0.03733442	0.03996403	0.04040554	0.04048178
42.47191	0.03970088	0.0427312	0.04330615	0.04344806
44.49438	0.04214494	0.04562629	0.04635718	0.04657781
46.51685	0.04467129	0.04865931	0.04957153	0.04988568
48.53933	0.0472847	0.05184096	0.05296303	0.05338759
50.5618	0.0499901	0.05518257	0.05654662	0.05710069
52.58427	0.05279245	0.05869613	0.06033834	0.06104371
54.60674	0.05569682	0.06239449	0.06435552	0.06523694
56.62921	0.0587083	0.06629123	0.06861685	0.06970242
58.65169	0.06183207	0.0704008	0.07314248	0.07446414
60.67416	0.06507325	0.07473855	0.07795418	0.07954825
62.69663	0.06843701	0.0793208	0.08307543	0.08498321
64.7191	0.07192846	0.08416477	0.08853161	0.09079999

เอกสารนี้เป็นเอกสาร
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น

นโยบายด้านการค้า

มีการนำไปใช้

66.74157	0.07555258	0.08928876	0.09435008	0.09703241
68.76404	0.07931421	0.09471216	0.10056034	0.10371733
70.78652	0.08321807	0.10045537	0.10719432	0.1108949
72.80899	0.08726847	0.10653988	0.11428627	0.11860894
74.83146	0.09146954	0.11298833	0.12187325	0.12690721
76.85393	0.09582481	0.11982447	0.12999502	0.13584183
78.8764	0.1003374	0.12707302	0.13869436	0.14546941
80.89888	0.10500972	0.13475978	0.14801712	0.15585172
82.92135	0.10984347	0.14291152	0.15801241	0.16705596
84.94382	0.11483933	0.15155563	0.16873278	0.17915505
86.96629	0.11999701	0.16072032	0.18023406	0.19222815
88.98876	0.12531485	0.17043413	0.19257575	0.20636116
91.01124	0.13078986	0.18072587	0.20582069	0.22164662
93.03371	0.13641731	0.19162393	0.22003511	0.23818462
95.05618	0.14219059	0.20315625	0.23528835	0.25608259
97.07865	0.14810096	0.21534954	0.25165272	0.27545574
99.10112	0.15413722	0.22822866	0.26920259	0.29642692
101.1236	0.16028556	0.24181591	0.28801438	0.31912637
103.1461	0.16652919	0.25612989	0.30816501	0.34369141
105.1685	0.17284788	0.27118483	0.32973099	0.37026569
107.191	0.17921801	0.28698888	0.35278687	0.39899817
109.2135	0.18561189	0.30354264	0.37740311	0.43004081
111.236	0.19199771	0.32083791	0.40364379	0.46354708
113.2584	0.19833906	0.33885506	0.43156347	0.49966797
115.2809	0.20459498	0.35756138	0.46120331	0.53854835
117.3034	0.21071941	0.37690851	0.49258718	0.58032113
119.3258	0.21666121	0.39682987	0.52571553	0.62510085
121.3483	0.22236395	0.41723761	0.56056023	0.67297506
123.3708	0.22776607	0.43801978	0.59705621	0.72399324
125.3933	0.23280081	0.45903727	0.63509476	0.77815485
127.4157	0.23739643	0.48012111	0.6745131	0.83539462
129.4382	0.24147688	0.50106865	0.71508586	0.89556313
131.4607	0.2449618	0.52164185	0.75651282	0.95840913
133.4831	0.24776779	0.541565	0.79841	1.0235554
135.5056	0.24980891	0.56052279	0.84029788	1.09047365
137.5281	0.25099772	0.57816124	0.88159132	1.15846074
139.5506	0.25124702	0.5940873	0.92159128	1.22661066

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการวิจัยเท่านั้น มิอนุญาตให้มีการเผยแพร่หรือใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น กรุณาอย่าเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต และสงวนลิขสิทธิ์ของเอกสารชุดนี้ไว้ทั้งหมด

141.573	0.25047114	0.60787272	0.95948082	1.29379094
143.5955	0.24858736	0.61905795	0.99432015	1.35862219
145.618	0.2455183	0.62715924	1.02505362	1.41946495
147.6404	0.24119365	0.63167799	1.05051851	1.47441685
149.6629	0.23555219	0.63211352	1.06946361	1.52132404
151.6854	0.22854419	0.62797642	1.08057904	1.55781293
153.7079	0.22013345	0.61880702	1.08253384	1.58134472
155.7303	0.21029936	0.60419363	1.07402682	1.58929634
157.7528	0.19903858	0.5837937	1.05384505	1.57907176
159.7753	0.18636686	0.55735439	1.02093422	1.54823542
161.7978	0.17232005	0.52473342	0.97446942	1.49467659
163.8202	0.15695524	0.48591742	0.91393	1.41678202
165.8427	0.14035061	0.44103706	0.8391692	1.31361246
167.8652	0.12260546	0.39037743	0.7504701	1.18506455
169.8876	0.10383924	0.33438253	0.64858556	1.03200042
171.9101	0.08419017	0.27365246	0.53475392	0.85632163
173.9326	0.06381309	0.20893325	0.41068423	0.66097748
175.9551	0.04287696	0.14109907	0.27851337	0.44989237
177.9775	0.02156166	0.07112732	0.14072984	0.22781236
180	0	0	0	0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางแสดงผลการคำนวณการกระจายแรงดันที่สภาวะต่างๆที่ความเร็วรอบ 222 รอบต่อนาที

Theta	ϵ			
	0.226	0.372	0.464	0.526
0	0	0	0	0
2.022472	0.0013701	0.00160613	0.00164854	0.00165023
4.044944	0.00274334	0.00323036	0.00332446	0.003334
6.067416	0.00411824	0.00485974	0.00500744	0.00502596
8.089888	0.00549635	0.00649751	0.00670151	0.00673052
10.11236	0.00687877	0.00814651	0.00841049	0.00845203
12.13483	0.00826655	0.00980962	0.01013821	0.0101949
14.1573	0.00966074	0.01148971	0.01188855	0.01196359
16.17978	0.01106237	0.0131897	0.0136655	0.01376269
18.20225	0.01247245	0.01491252	0.01547311	0.01559692
20.22472	0.01389197	0.01666117	0.01731552	0.01747114
22.24719	0.01532189	0.01843865	0.01919701	0.01939037
24.26966	0.01676314	0.02024805	0.02112199	0.02135983
26.29213	0.01821663	0.02209248	0.02309496	0.02338494
28.31461	0.01968321	0.02397511	0.02512062	0.02547135
30.33708	0.0211637	0.02589916	0.02720382	0.02762496
32.35955	0.02265887	0.0278679	0.0293496	0.02985197
34.38202	0.02416943	0.02988468	0.03156315	0.03215886
36.40449	0.02569602	0.03195287	0.03384991	0.03455243
38.42697	0.02723923	0.0340759	0.03621551	0.03703985
40.44944	0.02879957	0.03625728	0.03866582	0.03962867
42.47191	0.03037745	0.03850054	0.04120694	0.04232684
44.49438	0.03197319	0.04080924	0.04384523	0.04514272
46.51685	0.03358704	0.04318701	0.04658729	0.04808516
48.53933	0.03521907	0.04563747	0.04943999	0.05116353
50.5618	0.03686929	0.04816427	0.0524105	0.05438765
52.58427	0.03853754	0.05077105	0.05550624	0.05776794
54.60674	0.04022351	0.05346146	0.0587349	0.06131537
56.62921	0.04192673	0.05623907	0.06210449	0.06504153
58.65169	0.04364657	0.05910739	0.06562325	0.06895863
60.67416	0.0453822	0.06206989	0.06929969	0.07307953
62.69663	0.04713253	0.06512986	0.07314261	0.07741773
64.7191	0.04889636	0.06829046	0.07716094	0.08198748

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น

66.74157	0.0506721	0.07155463	0.08136393	0.08680363
68.76404	0.05245804	0.07492506	0.08576091	0.0918818
70.78652	0.0542521	0.07840414	0.09036129	0.09723821
72.80899	0.05605194	0.08199389	0.09517463	0.10288983
74.83146	0.05785492	0.08569589	0.10021038	0.10885419
76.85393	0.05965802	0.08951121	0.10547798	0.11514942
78.8764	0.0614579	0.09344028	0.11098653	0.12179419
80.89888	0.06325083	0.09748288	0.11674494	0.12880747
82.92135	0.06503274	0.10163794	0.12276147	0.13620861
84.94382	0.06679908	0.10590344	0.12904379	0.1440171
86.96629	0.06854493	0.11027641	0.13559875	0.1522522
88.98876	0.07026496	0.11475259	0.14243209	0.16093308
91.01124	0.0719533	0.11932644	0.14954808	0.17007801
93.03371	0.07360372	0.12399094	0.15694948	0.17970455
95.05618	0.07520949	0.12873738	0.16463684	0.18982862
97.07865	0.07676342	0.13355522	0.17260848	0.20046438
99.10112	0.07825786	0.13843195	0.18085986	0.21162325
101.1236	0.0796847	0.1433529	0.18938304	0.22331364
103.1461	0.08103544	0.14830089	0.19816628	0.23553973
105.1685	0.08230107	0.15325633	0.20719345	0.24830082
107.191	0.08347226	0.15819684	0.21644334	0.26159021
109.2135	0.08453923	0.16309716	0.2258891	0.27539381
111.236	0.08549199	0.1679289	0.23549749	0.28968921
113.2584	0.08632018	0.17266065	0.24522813	0.30444381
115.2809	0.08701324	0.17725761	0.25503296	0.31961352
117.3034	0.08756048	0.18168166	0.26485518	0.33514094
119.3258	0.08795112	0.18589151	0.27462906	0.35095364
121.3483	0.08817432	0.18984237	0.28427893	0.36696234
123.3708	0.08821946	0.19348648	0.29371867	0.38305879
125.3933	0.088076	0.19677298	0.30285153	0.39911467
127.4157	0.0877338	0.1996484	0.31156984	0.4149788
129.4382	0.08718311	0.202057	0.31975484	0.43047711
131.4607	0.08641468	0.20394123	0.32727718	0.44541034
133.4831	0.08542005	0.20524237	0.33399749	0.45955458
135.5056	0.08419149	0.20590116	0.33976716	0.47266006
137.5281	0.08272229	0.20585872	0.34443	0.48445347
139.5506	0.08100674	0.20505753	0.34782416	0.49463925

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่รวมไว้สำหรับการศึกษาเท่านั้น ไม่สามารถนำออกจำหน่ายหรือเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตจากศูนย์บริการข้อมูลข่าวสาร
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น

141.573	0.07904043	0.20344235	0.34978437	0.50290221
143.5955	0.07682028	0.20096144	0.35014501	0.50891292
145.618	0.07434466	0.19756788	0.34874353	0.51233268
147.6404	0.07161354	0.19322073	0.3454248	0.51282138
149.6629	0.06862859	0.18788627	0.34004474	0.5100463
151.6854	0.06539319	0.1815394	0.33247578	0.50369203
153.7079	0.06191261	0.17416486	0.32261145	0.49347258
155.7303	0.05819397	0.16575822	0.31037146	0.47914273
157.7528	0.05424626	0.15632693	0.29570654	0.46051195
159.7753	0.05008041	0.14589134	0.27860287	0.43745586
161.7978	0.04570917	0.13448478	0.2590858	0.40992871
163.8202	0.04114715	0.12215441	0.23722276	0.37797302
165.8427	0.03641064	0.10896064	0.21312544	0.34172761
167.8652	0.03151755	0.09497741	0.18694979	0.30143198
169.8876	0.02648729	0.08029086	0.15889561	0.25742742
171.9101	0.02134058	0.06499884	0.12920378	0.21015373
173.9326	0.01609929	0.04920932	0.09815245	0.1601415
175.9551	0.01078618	0.03303879	0.06605169	0.10800023
177.9775	0.00542473	0.01661035	0.03323658	0.05440252
180	0	0	0	0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางแสดงผลการคำนวณการกระจายแรงดันที่สภาวะต่างๆที่ความเร็วรอบ 507 รอบต่อนาที

Theta	ϵ			
	0.107	0.202	0.279	0.342
0	0	0	0	0
2.022472	0.00088771	0.00130036	0.00148819	0.00157814
4.044944	0.0017666	0.0026014	0.00298496	0.00317133
6.067416	0.00264468	0.00390353	0.00448469	0.00476899
8.089888	0.00352229	0.005208	0.00598957	0.00637403
10.11236	0.00439926	0.00651563	0.00750137	0.00798897
12.13483	0.00527543	0.00782716	0.0090218	0.00961632
14.1573	0.00615061	0.00914337	0.01055258	0.0112586
16.17978	0.00702459	0.01046496	0.01209544	0.01291833
18.20225	0.00789717	0.01179266	0.01365208	0.01459809
20.22472	0.00876809	0.01312716	0.01522421	0.01630042
22.24719	0.00963712	0.01446909	0.01681352	0.01802796
24.26966	0.01050398	0.0158191	0.0184217	0.01978329
26.29213	0.01136836	0.01717776	0.0200504	0.02156908
28.31461	0.01222993	0.0185456	0.02170128	0.02338798
30.33708	0.01308835	0.01992314	0.02337597	0.0252427
32.35955	0.01394321	0.0213108	0.02507605	0.02713596
34.38202	0.0147941	0.02270897	0.02680309	0.02907046
36.40449	0.01564055	0.02411796	0.02855862	0.031049
38.42697	0.01648208	0.02553803	0.03034411	0.03307431
40.44944	0.01731815	0.02696934	0.032161	0.03514917
42.47191	0.01814818	0.02841199	0.03401063	0.03727636
44.49438	0.01897153	0.02986595	0.03589429	0.03945865
46.51685	0.01978756	0.03133113	0.03781319	0.04169879
48.53933	0.02059553	0.03280729	0.03976844	0.0439995
50.5618	0.02139469	0.03429412	0.04176101	0.04636345
52.58427	0.02218422	0.03579114	0.04379177	0.04879326
54.60674	0.02296324	0.03729772	0.04586145	0.05129149
56.62921	0.02373084	0.03881314	0.04797058	0.05386057
58.65169	0.02448603	0.04033648	0.05011953	0.0565028
60.67416	0.02522778	0.04186664	0.05230848	0.05922036
62.69663	0.02595499	0.04340234	0.05453734	0.06201527
64.7191	0.02666653	0.04494214	0.05680577	0.06488921

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น การนำเอกสารนี้ไปใช้โดยไม่ได้รับอนุญาตถือว่าผิดกฎหมาย

66.74157	0.02736118	0.04648436	0.05911315	0.06784373
68.76404	0.02803768	0.04802709	0.06145854	0.07088003
70.78652	0.02869471	0.04956824	0.06384064	0.07399894
72.80899	0.02933091	0.05110539	0.06625777	0.07720086
74.83146	0.02994483	0.05263596	0.06870782	0.08048578
76.85393	0.030535	0.05415703	0.07118823	0.08385312
78.8764	0.03109988	0.05566542	0.07369589	0.08730168
80.89888	0.03163791	0.05715768	0.0762272	0.09082955
82.92135	0.03214746	0.05863002	0.07877794	0.09443412
84.94382	0.03262686	0.0600784	0.08134325	0.09811184
86.96629	0.0330744	0.06149841	0.0839176	0.10185825
88.98876	0.03348836	0.06288538	0.08649474	0.10566777
91.01124	0.03386699	0.06423423	0.08906767	0.1095337
93.03371	0.0342085	0.06553965	0.09162851	0.11344799
95.05618	0.0345111	0.06679596	0.09416859	0.11740124
97.07865	0.034773	0.06799717	0.09667834	0.12138257
99.10112	0.0349924	0.069137	0.09914727	0.12537935
101.1236	0.03516754	0.07020886	0.10156395	0.12937729
103.1461	0.03529663	0.07120589	0.10391593	0.13336019
105.1685	0.03537795	0.07212096	0.10618988	0.13730989
107.191	0.0354098	0.07294675	0.10837145	0.14120618
109.2135	0.03539056	0.07367575	0.1104453	0.14502667
111.236	0.03531864	0.0743002	0.11239516	0.14874682
113.2584	0.03519254	0.0748123	0.11420397	0.1523398
115.2809	0.03501086	0.07520417	0.11585369	0.1557765
117.3034	0.03477226	0.07546794	0.1173256	0.15902565
119.3258	0.03447557	0.07559572	0.1186003	0.16205379
121.3483	0.03411969	0.07557973	0.11965789	0.16482534
123.3708	0.03370369	0.07541246	0.12047803	0.16730292
125.3933	0.03322678	0.0750866	0.12104017	0.16944742
127.4157	0.03268835	0.07459512	0.12132376	0.17121828
129.4382	0.03208793	0.0739315	0.12130841	0.172574
131.4607	0.03142525	0.07308969	0.12097418	0.17347239
133.4831	0.03070027	0.07206426	0.12030174	0.17387107
135.5056	0.02991311	0.07085041	0.11927284	0.17372815
137.5281	0.02906412	0.06944418	0.1178704	0.17300269
139.5506	0.02815388	0.06784241	0.11607898	0.17165554

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับครู ใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีโทษตามกฎหมาย และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

141.573	0.02718321	0.06604297	0.11388499	0.16965002
143.5955	0.02615314	0.06404472	0.11127707	0.16695265
145.618	0.02506497	0.06184757	0.10824643	0.16353406
147.6404	0.02392021	0.05945268	0.10478704	0.15936978
149.6629	0.02272063	0.05686239	0.10089599	0.15444109
151.6854	0.02146824	0.05408033	0.09657387	0.14873573
153.7079	0.02016527	0.05111142	0.09182469	0.14224878
155.7303	0.01881423	0.04796189	0.0866564	0.13498317
157.7528	0.01741781	0.04463933	0.08108073	0.12695025
159.7753	0.01597892	0.0411526	0.07511352	0.1181704
161.7978	0.01450072	0.03751187	0.06877451	0.10867298
163.8202	0.01298653	0.03372852	0.06208744	0.09849669
165.8427	0.01143985	0.02981511	0.05507982	0.08768921
167.8652	0.00986436	0.02578531	0.04778282	0.0763071
169.8876	0.00826389	0.02165377	0.04023095	0.0644152
171.9101	0.00664239	0.017436	0.03246173	0.05208586
173.9326	0.00500393	0.0131483	0.0245153	0.03939806
175.9551	0.00335266	0.00880759	0.01643397	0.02643631
177.9775	0.00169276	0.0044312	0.00826169	0.0132894
180	0	0	0	0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางแสดงผลการคำนวณการกระจายอุณหภูมิที่สภาวะต่างๆที่ความเร็วรอบ 95 รอบต่อนาที

Theta	ϵ			
	0.407	0.558	0.633	0.68
0	300	300	300	300
2.022472	300.000031	300.000031	300.000031	300
4.044944	300.000061	300.000061	300.000061	300.000031
6.067416	300.000092	300.000092	300.000092	300.000061
8.089888	300.000122	300.000122	300.000122	300.000092
10.11236	300.000153	300.000153	300.000153	300.000122
12.13483	300.000183	300.000183	300.000183	300.000153
14.1573	300.000214	300.000214	300.000214	300.000183
16.17978	300.000244	300.000244	300.000244	300.000214
18.20225	300.000275	300.000275	300.000275	300.000244
20.22472	300.000305	300.000305	300.000305	300.000275
22.24719	300.000336	300.000336	300.000336	300.000305
24.26966	300.000366	300.000366	300.000366	300.000336
26.29213	300.000397	300.000397	300.000397	300.000366
28.31461	300.000427	300.000427	300.000427	300.000397
30.33708	300.000458	300.000458	300.000458	300.000427
32.35955	300.000488	300.000488	300.000488	300.000458
34.38202	300.000519	300.000519	300.000519	300.000488
36.40449	300.000549	300.00058	300.00058	300.000519
38.42697	300.00061	300.000641	300.000641	300.00058
40.44944	300.000671	300.000702	300.000702	300.000641
42.47191	300.000732	300.000763	300.000763	300.000702
44.49438	300.000793	300.000824	300.000824	300.000763
46.51685	300.000854	300.000916	300.000916	300.000854
48.53933	300.000916	300.001007	300.001007	300.000946
50.5618	300.001007	300.001099	300.001129	300.001068
52.58427	300.001099	300.001221	300.001251	300.00119
54.60674	300.00119	300.001343	300.001404	300.001343
56.62921	300.001282	300.001495	300.001556	300.001526
58.65169	300.001404	300.001678	300.00174	300.00174
60.67416	300.001526	300.001862	300.001953	300.001984
62.69663	300.001648	300.002075	300.002228	300.002258

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น ขอสงวนสิทธิ์ในสิ่งที่ปรากฏและขอสงวนสิทธิ์ในการนำไปใช้

64.7191	300.001801	300.002319	300.002533	300.002594
66.74157	300.001953	300.002625	300.002899	300.002991
68.76404	300.002136	300.00296	300.003326	300.003479
70.78652	300.00235	300.003357	300.003845	300.004059
72.80899	300.002563	300.003815	300.004456	300.004761
74.83146	300.002808	300.004333	300.005157	300.005585
76.85393	300.003082	300.004944	300.006012	300.006592
78.8764	300.003387	300.005676	300.007019	300.007813
80.89888	300.003723	300.0065	300.008209	300.009277
82.92135	300.004089	300.007477	300.009644	300.011078
84.94382	300.004486	300.008606	300.011383	300.013275
86.96629	300.004913	300.009949	300.013458	300.015961
88.98876	300.005371	300.011505	300.015961	300.019226
91.01124	300.00589	300.013306	300.018982	300.023254
93.03371	300.006439	300.015411	300.022614	300.028198
95.05618	300.00705	300.017883	300.027008	300.034271
97.07865	300.00769	300.020752	300.032288	300.041779
99.10112	300.008392	300.024109	300.038666	300.051056
101.1236	300.009125	300.027985	300.046387	300.0625
103.1461	300.009918	300.032501	300.055695	300.07666
105.1685	300.010773	300.03772	300.066895	300.094208
107.191	300.011658	300.043732	300.080383	300.115906
109.2135	300.012573	300.050629	300.096619	300.142731
111.236	300.013519	300.058502	300.116058	300.175903
113.2584	300.014465	300.067474	300.139313	300.216827
115.2809	300.015442	300.077606	300.166992	300.267212
117.3034	300.016388	300.088959	300.199799	300.329071
119.3258	300.017303	300.101563	300.238495	300.404724
121.3483	300.018188	300.115448	300.283783	300.496826
123.3708	300.019012	300.130524	300.336395	300.608307
125.3933	300.019745	300.146698	300.396912	300.742279
127.4157	300.020355	300.163788	300.465759	300.901947
129.4382	300.020874	300.181458	300.54303	301.09024
131.4607	300.021271	300.19931	300.628387	301.30954
133.4831	300.021515	300.216858	300.720856	301.561127
135.5056	300.021667	300.23349	300.818726	301.844513
137.5281	300.021729	300.248566	300.919403	302.156738

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น

139.5506	300.021729	300.261414	301.019348	302.491486
141.573	300.021759	300.271484	301.114136	302.838348
143.5955	300.021881	300.278412	301.198792	303.182526
145.618	300.022247	300.282196	301.26828	303.505157
147.6404	300.02298	300.283417	301.318542	303.784912
149.6629	300.024261	300.283417	301.347809	304.001282
151.6854	300.026276	300.284515	301.358398	304.139984
153.7079	300.029205	300.290161	301.358734	304.200958
155.7303	300.033295	300.304993	301.365509	304.208313
157.7528	300.038757	300.334869	301.405365	304.2211
159.7753	300.045807	300.386566	301.515625	304.342926
161.7978	300.054596	300.467438	301.743561	304.72699
163.8202	300.065277	300.584839	302.143677	305.572937
165.8427	300.077911	300.7453	302.77243	307.112152
167.8652	300.092499	300.953827	303.681274	309.580231
169.8876	300.108948	301.212891	304.90799	313.178223
171.9101	300.127136	301.521881	306.468384	318.028717
173.9326	300.14679	301.876648	308.349731	324.135986
175.9551	300.167633	302.26944	310.50766	331.361237
177.9775	300.189301	302.689331	312.867889	339.422333
180	300.211487	303.123901	315.335419	347.927429

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางแสดงผลการคำนวณการกระจายอนุกรมที่สภาวะต่างๆที่ความเร็วรอบ 222 รอบต่อนาที

Theta	ϵ			
	0.226	0.372	0.464	0.526
0	300	300	300	300
2.022472	300.000275	300.000305	300.000275	300.000244
4.044944	300.000549	300.00061	300.000549	300.000519
6.067416	300.000824	300.000916	300.000824	300.000793
8.089888	300.001099	300.001221	300.001099	300.001068
10.11236	300.001373	300.001526	300.001404	300.001343
12.13483	300.001648	300.001831	300.001709	300.001617
14.1573	300.001923	300.002167	300.002014	300.001923
16.17978	300.002197	300.002502	300.00235	300.002228
18.20225	300.002472	300.002838	300.002686	300.002533
20.22472	300.002777	300.003204	300.003052	300.002869
22.24719	300.003082	300.003571	300.003418	300.003235
24.26966	300.003387	300.003967	300.003815	300.003601
26.29213	300.003693	300.004364	300.004242	300.003998
28.31461	300.003998	300.004791	300.004669	300.004425
30.33708	300.004333	300.005249	300.005127	300.004883
32.35955	300.004669	300.005737	300.005646	300.005402
34.38202	300.005005	300.006256	300.006195	300.005951
36.40449	300.005371	300.006805	300.006775	300.006561
38.42697	300.005737	300.007385	300.007416	300.007233
40.44944	300.006104	300.007996	300.008118	300.007965
42.47191	300.0065	300.008667	300.008881	300.008759
44.49438	300.006897	300.009369	300.009705	300.009644
46.51685	300.007324	300.010132	300.01062	300.010651
48.53933	300.007751	300.010956	300.011627	300.011749
50.5618	300.008209	300.011841	300.012756	300.013
52.58427	300.008667	300.012817	300.014008	300.014404
54.60674	300.009155	300.013855	300.015381	300.015991
56.62921	300.009644	300.014984	300.016907	300.017761
58.65169	300.010162	300.016205	300.018616	300.019775
60.67416	300.010681	300.017548	300.020538	300.022064
62.69663	300.01123	300.019012	300.022675	300.024658
64.7191	300.01178	300.020599	300.025085	300.027618

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อใช้ในการศึกษาวิจัยและนโยบายด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น

66.74157	300.01236	300.022339	300.027771	300.031006
68.76404	300.012939	300.024231	300.030792	300.034882
70.78652	300.013519	300.026276	300.03418	300.039337
72.80899	300.01413	300.028503	300.037994	300.044434
74.83146	300.01474	300.030945	300.042297	300.050293
76.85393	300.015381	300.033569	300.04715	300.057037
78.8764	300.016022	300.036438	300.052612	300.064789
80.89888	300.016663	300.039551	300.058746	300.07373
82.92135	300.017303	300.042908	300.065643	300.084015
84.94382	300.017944	300.046539	300.073395	300.095886
86.96629	300.018585	300.050446	300.082123	300.109558
88.98876	300.019226	300.054657	300.091919	300.125336
91.01124	300.019836	300.059174	300.102905	300.143494
93.03371	300.020416	300.063995	300.115173	300.164398
95.05618	300.020996	300.069122	300.128876	300.188416
97.07865	300.021545	300.074554	300.144104	300.216003
99.10112	300.022064	300.080292	300.161011	300.247589
101.1236	300.022552	300.086273	300.179688	300.283691
103.1461	300.02298	300.092499	300.200256	300.324799
105.1685	300.023376	300.098938	300.222748	300.37149
107.191	300.023712	300.105499	300.247253	300.424286
109.2135	300.023987	300.112152	300.273743	300.483704
111.236	300.024231	300.118805	300.302185	300.550201
113.2584	300.024414	300.125366	300.332428	300.624146
115.2809	300.024536	300.131744	300.364288	300.70575
117.3034	300.024628	300.137817	300.397491	300.795044
119.3258	300.024658	300.143463	300.43161	300.891754
121.3483	300.024658	300.14859	300.466095	300.9953
123.3708	300.024658	300.153076	300.500336	301.104675
125.3933	300.024658	300.15683	300.5336	301.218323
127.4157	300.024689	300.15976	300.565033	301.334229
129.4382	300.02478	300.161865	300.59375	301.449707
131.4607	300.024963	300.163208	300.618896	301.561646
133.4831	300.025269	300.163849	300.639679	301.666412
135.5056	300.025726	300.164032	300.655548	301.760223
137.5281	300.026398	300.164032	300.66626	301.839386
139.5506	300.027313	300.164307	300.672119	301.900879

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ของกรมการศึกษานานาชาติ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดเป็นลงมือทำ และต้องอ้างอิงถึงชื่อเอกสารที่กรังที่มีการนำไปใช้

141.573	300.028534	300.165405	300.674133	301.942993
143.5955	300.03009	300.168091	300.674194	301.966156
145.618	300.032074	300.173218	300.675293	301.973938
147.6404	300.034515	300.181793	300.681641	301.974091
149.6629	300.037445	300.194946	300.698822	301.979584
151.6854	300.040924	300.213928	300.733734	302.00943
153.7079	300.044983	300.240021	300.794556	302.089172
155.7303	300.049652	300.274506	300.890472	302.250763
157.7528	300.054962	300.318604	301.031311	302.531769
159.7753	300.060913	300.373383	301.226929	302.973633
161.7978	300.067505	300.439728	301.486603	303.618958
163.8202	300.074738	300.518188	301.818176	304.508026
165.8427	300.082581	300.608978	302.227264	305.674591
167.8652	300.091003	300.711914	302.716583	307.141632
169.8876	300.099915	300.826385	303.285187	308.917236
171.9101	300.109283	300.951324	303.928253	310.991669
173.9326	300.119019	301.085205	304.63681	313.335724
175.9551	300.129059	301.226135	305.398163	315.901184
177.9775	300.139282	301.371918	306.19635	318.623199
180	300.14975	301.521057	307.016052	321.431458

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางแสดงผลการคำนวณการกระจายอนุกรมที่สภาวะต่างๆที่ความเร็วรอบ 507 รอบต่อนาที

Theta	ϵ			
	0.107	0.202	0.279	0.342
0	300	300	300	300
2.022472	300.000275	300.000305	300.000275	300.000244
4.044944	300.000549	300.00061	300.000549	300.000519
6.067416	300.000824	300.000916	300.000824	300.000793
8.089888	300.001099	300.001221	300.001099	300.001068
10.11236	300.001373	300.001526	300.001404	300.001343
12.13483	300.001648	300.001831	300.001709	300.001617
14.1573	300.001923	300.002167	300.002014	300.001923
16.17978	300.002197	300.002502	300.00235	300.002228
18.20225	300.002472	300.002838	300.002686	300.002533
20.22472	300.002777	300.003204	300.003052	300.002869
22.24719	300.003082	300.003571	300.003418	300.003235
24.26966	300.003387	300.003967	300.003815	300.003601
26.29213	300.003693	300.004364	300.004242	300.003998
28.31461	300.003998	300.004791	300.004669	300.004425
30.33708	300.004333	300.005249	300.005127	300.004883
32.35955	300.004669	300.005737	300.005646	300.005402
34.38202	300.005005	300.006256	300.006195	300.005951
36.40449	300.005371	300.006805	300.006775	300.006561
38.42697	300.005737	300.007385	300.007416	300.007233
40.44944	300.006104	300.007996	300.008118	300.007965
42.47191	300.0065	300.008667	300.008881	300.008759
44.49438	300.006897	300.009369	300.009705	300.009644
46.51685	300.007324	300.010132	300.01062	300.010651
48.53933	300.007751	300.010956	300.011627	300.011749
50.5618	300.008209	300.011841	300.012756	300.013
52.58427	300.008667	300.012817	300.014008	300.014404
54.60674	300.009155	300.013855	300.015381	300.015991
56.62921	300.009644	300.014984	300.016907	300.017761
58.65169	300.010162	300.016205	300.018616	300.019775
60.67416	300.010681	300.017548	300.020538	300.022064
62.69663	300.01123	300.019012	300.022675	300.024658
64.7191	300.01178	300.020599	300.025085	300.027618

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อใช้ในการศึกษาวิจัยเท่านั้น ไม่ควรนำข้อมูลไปใช้ในการค้าหรือการนำไปใช้

66.74157	300.01236	300.022339	300.027771	300.031006
68.76404	300.012939	300.024231	300.030792	300.034882
70.78652	300.013519	300.026276	300.03418	300.039337
72.80899	300.01413	300.028503	300.037994	300.044434
74.83146	300.01474	300.030945	300.042297	300.050293
76.85393	300.015381	300.033569	300.04715	300.057037
78.8764	300.016022	300.036438	300.052612	300.064789
80.89888	300.016663	300.039551	300.058746	300.07373
82.92135	300.017303	300.042908	300.065643	300.084015
84.94382	300.017944	300.046539	300.073395	300.095886
86.96629	300.018585	300.050446	300.082123	300.109558
88.98876	300.019226	300.054657	300.091919	300.125336
91.01124	300.019836	300.059174	300.102905	300.143494
93.03371	300.020416	300.063995	300.115173	300.164398
95.05618	300.020996	300.069122	300.128876	300.188416
97.07865	300.021545	300.074554	300.144104	300.216003
99.10112	300.022064	300.080292	300.161011	300.247589
101.1236	300.022552	300.086273	300.179688	300.283691
103.1461	300.02298	300.092499	300.200256	300.324799
105.1685	300.023376	300.098938	300.222748	300.37149
107.191	300.023712	300.105499	300.247253	300.424286
109.2135	300.023987	300.112152	300.273743	300.483704
111.236	300.024231	300.118805	300.302185	300.550201
113.2584	300.024414	300.125366	300.332428	300.624146
115.2809	300.024536	300.131744	300.364288	300.70575
117.3034	300.024628	300.137817	300.397491	300.795044
119.3258	300.024658	300.143463	300.43161	300.891754
121.3483	300.024658	300.14859	300.466095	300.9953
123.3708	300.024658	300.153076	300.500336	301.104675
125.3933	300.024658	300.15683	300.5336	301.218323
127.4157	300.024689	300.15976	300.565033	301.334229
129.4382	300.02478	300.161865	300.59375	301.449707
131.4607	300.024963	300.163208	300.618896	301.561646
133.4831	300.025269	300.163849	300.639679	301.666412
135.5056	300.025726	300.164032	300.655548	301.760223
137.5281	300.026398	300.164032	300.66626	301.839386
139.5506	300.027313	300.164307	300.672119	301.900879

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับใช้ภายในเท่านั้น ไม่สามารถเผยแพร่หรือใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดเป็นลงมือทำ และต้องอ้างอิงถึงชื่อของเอกสารที่กล่าวถึงที่มีการนำไปใช้

141.573	300.028534	300.165405	300.674133	301.942993
143.5955	300.03009	300.168091	300.674194	301.966156
145.618	300.032074	300.173218	300.675293	301.973938
147.6404	300.034515	300.181793	300.681641	301.974091
149.6629	300.037445	300.194946	300.698822	301.979584
151.6854	300.040924	300.213928	300.733734	302.00943
153.7079	300.044983	300.240021	300.794556	302.089172
155.7303	300.049652	300.274506	300.890472	302.250763
157.7528	300.054962	300.318604	301.031311	302.531769
159.7753	300.060913	300.373383	301.226929	302.973633
161.7978	300.067505	300.439728	301.486603	303.618958
163.8202	300.074738	300.518188	301.818176	304.508026
165.8427	300.082581	300.608978	302.227264	305.674591
167.8652	300.091003	300.711914	302.716583	307.141632
169.8876	300.099915	300.826385	303.285187	308.917236
171.9101	300.109283	300.951324	303.928253	310.991669
173.9326	300.119019	301.085205	304.63681	313.335724
175.9551	300.129059	301.226135	305.398163	315.901184
177.9775	300.139282	301.371918	306.19635	318.623199
180	300.14975	301.521057	307.016052	321.431458

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้