

คุณลักษณะการสึกหรอของเฟืองตรงขนาดเล็ก  
ในระบบส่งกำลังแม่นยำสูง

WEAR CHARACTERISTICS OF MINIATURE SPUR GEAR  
IN HIGH PRECISION TRANSMISSION SYSTEMS



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาระดับปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2548

ISBN 974-15-1834-5

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

คุณลักษณะการสึกหรอของเฟืองตรงขนาดเล็ก  
ในระบบส่งกำลังแม่นยำสูง

WEAR CHARACTERISTICS OF MINIATURE SPUR GEAR  
IN HIGH PRECISION TRANSMISSION SYSTEMS



เลขหมู่.....  
เลขทะเบียน..... 60581  
วัน,เดือน,ปี..... - 3 ก.ค. 2549

.b.....  
.i.....

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล  
บัณฑิตวิทยาลัย  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
พ.ศ.2548

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ ISBN 974-15-1831-5 นั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

WEAR CHARACTERISTICS OF MINIATURE SPUR GEAR  
IN HIGH PRECISION TRANSMISSION SYSTEMS



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

2005

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกานานี้ ISBN 974-15-1831-5 นั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2005

SCHOOL OF GRADUATE STUDIES

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	คุณลักษณะการสึกหรอของเฟืองตรงขนาดเล็กในระบบส่งกำลัง แม่นยำสูง
นักศึกษา	นายอานัติ หาททรัพย์
รหัสนักศึกษา	43062014
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมเครื่องกล
พ.ศ.	2548
อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์	รศ.ดร. มงคล มงคลวงศ์โรจน์

### บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอการศึกษาถึงคุณลักษณะด้านการสึกหรอของเฟืองตรงขนาดเล็กในระบบส่งกำลังแม่นยำสูง ซึ่งประกอบด้วยเฟืองตรงขนาดเล็กที่ทำมาจากวัสดุในกลุ่มโพลีเมอร์คือ โพลีเอไมด์ และโพลีออกซีเมทิลีนโดยได้ทำการออกแบบและสร้างเครื่องทดสอบที่ใช้ในการทดสอบการส่งถ่ายกำลังของเฟืองตรงขนาดเล็กขึ้นแล้วทำการทวนสอบความถูกต้องของเครื่องทดสอบดังกล่าว จากนั้นทำการทดลองศึกษาผลกระทบของปัจจัยต่างๆที่มีผลต่อการสึกหรอของเฟืองตรงขนาดเล็ก อันได้แก่ แรงบิด ความเร็วรอบ และอายุการใช้งาน เป็นต้น แล้วหาความสัมพันธ์ของปัจจัยต่างๆต่อการสึกหรอของเฟืองตรงขนาดเล็ก ผลที่ได้จากการทดลองนี้สามารถนำไปใช้เป็นโมเดลในการออกแบบและประยุกต์ใช้งานเฟืองตรงขนาดเล็กในระบบส่งกำลังแม่นยำสูงซึ่งทำจากวัสดุโพลีเอไมด์และโพลีออกซีเมทิลีนต่อไปได้

<b>Thesis</b>	Wear characteristics of miniature spur gear in high precision transmission systems
<b>Student</b>	Anat Hasap
<b>Student ID.</b>	43062014
<b>Degree</b>	Master degree
<b>Programme</b>	Mechanical Engineering
<b>Year</b>	2548
<b>Thesis Advisor</b>	Assoc.Prof.Dr.Mongkol Mongkolwongrojn

## ABSTRACT

This thesis proposed the study of wear characteristics of miniature spur gears in high precision transmission systems which consist of miniature spur gears made of polymer materials. The Polyamide and Polyoxymethylene were used as materials in this study. The test equipment for power transmission of the miniature spur gear was designed, built and verified, then the tests were conducted to study the influence parameters such as torque, speed and life cycles on wear characteristics of miniature spur gears. The relationship among those parameters then were analyzed and calculated. The results of this thesis can be used as a model in designing and application of miniature spur gears made of Polyamide and Polyoxymethylene for high precision transmission systems.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จได้ด้วยความกรุณาจากอาจารย์ที่ปรึกษา รศ.ดร.มงคล มงคลวงศ์โรจน์ ที่ให้คำชี้แนะในการแก้ปัญหาตลอดจนให้ความรู้แก่ข้าพเจ้าจนในที่สุดทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ สำเร็จลงได้ ขอขอบคุณศูนย์พัฒนาและวิเคราะห์สมบัติของวัสดุ สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทยที่ให้การสนับสนุนด้านเครื่องมือวัดในการวิจัยนี้ ขอขอบคุณคุณประยงค์ อรัญญา ที่คอยให้คำแนะนำที่ดีเกี่ยวกับการใช้งานสเตรนเกจ ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการตรวจสอบคุณสมบัติวัสดุ คุณสมหวัง บรรเทา คุณสุเทพ โตลอย ที่ให้ความช่วยเหลือเกี่ยวกับการทดสอบคุณสมบัติทางกลของวัสดุ

อาณัติ หาทรัพย์



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย .....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VII
สารบัญรูป.....	XI
รายการสัญลักษณ์.....	XVI
บทที่ 1 บทนำ .....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา .....	1
1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	2
1.3 สมมติฐานของการศึกษา .....	2
1.4 ทฤษฎีหรือแนวความคิดที่ใช้ในการวิจัย .....	2
1.5 ขอบเขตการวิจัย .....	3
1.6 ขั้นตอนของการศึกษา .....	4
บทที่ 2 วรรณกรรมปริทรรศน์ .....	5
บทที่ 3 หลักการและทฤษฎี .....	7
3.1 ทฤษฎีเบื้องต้นเกี่ยวกับเฟือง .....	7
3.1.1 คุณสมบัติของเฟืองตรง .....	8
3.1.2 การคำนวณเกี่ยวกับเฟืองตรง .....	10
3.1.3 โมเดลการสึกหรอของเฟืองตรง.....	12
3.2 การผลิตและการใช้งานเฟือง .....	14
3.3 ความเสียหายของเฟือง .....	15
บทที่ 4 การทดลอง .....	19
4.1 การทดสอบแรงดึง (Tensile test) .....	19
4.2 การทดสอบความแข็งแรงแบบรีดคเวลและบริเนล .....	21

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
4.3 การทดสอบหาอัตราส่วนบิดของ (Poisson's ratio) .....	22
4.4 การเตรียมชิ้นงานเพื่องตรงสำหรับทดสอบการลึกรอ .....	23
4.5 การทดสอบการลึกรอของเพื่องตรง .....	24
4.6 การวัดความหยابผิวของเพื่องตรง .....	27
4.7 การวัดสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน .....	28
<b>บทที่ 5 ผลการทดลองและการวิเคราะห์ .....</b>	<b>30</b>
5.1 ผลการทดสอบแรงดึง .....	30
5.2 ผลการทดสอบความแข็ง .....	31
5.3 ผลการทดสอบหาอัตราส่วนบิดของ .....	32
5.4 การลึกรอเฉลี่ย .....	34
5.5 การวิเคราะห์ผลของอัตราส่วนความเค้นและความเร็วรอบ .....	44
5.6 การลึกรอของเพื่องตรงในรูป $\alpha$ และ $N^*$ .....	50
5.7 โปรไฟล์การลึกรอของเพื่องตรง .....	52
5.8 โมเดลการลึกรอของเพื่องตรง .....	56
5.9 ความหยابผิวของเพื่องตรง .....	59
5.10 สัมประสิทธิ์ความเสียดทาน .....	61
<b>บทที่ 6 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ .....</b>	<b>63</b>
6.1 สรุปผลการวิจัย .....	63
6.2 ข้อเสนอแนะ .....	64
<b>เอกสารอ้างอิง .....</b>	<b>65</b>
<b>ภาคผนวก ก การออกแบบชุดทดสอบการลึกรอของเพื่องตรง .....</b>	<b>67</b>
<b>ภาคผนวก ข ข้อมูลจากการทดลอง .....</b>	<b>86</b>
<b>ภาคผนวก ค ค่าสัมประสิทธิ์ของสมการการลึกรอ .....</b>	<b>102</b>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
ภาคผนวก ง ข้อมูลการวัดค่าความหยาบของผิวเฟืองตรง .....	105
ภาคผนวก จ คุณสมบัติของ โพลีเอไมด์ โพลีอีทกซิเมทิลีนและ เหล็กหล่อเบอร์ 30 .....	107
ภาคผนวก ฉ ภาพตัวอย่างการสึกหรอของเฟืองเมื่อทดสอบครบ 5 ล้านรอบ.....	110
ภาคผนวก ช ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์.....	113
ประวัติผู้เขียน .....	121



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
3.1 คุณสมบัติของเฟืองตรง .....	11
4.1 สภาวะที่ใช้ทดสอบเพื่อศึกษาผลกระทบของแรงบิดและความเร็วรอบต่อการสึกหรอ .....	26
5.1 ผลการทดสอบแรงดึง .....	31
5.2 ผลการทดสอบความแข็งแรงรีดคเวล .....	31
5.3 ผลการทดสอบความแข็งแรงแบบบริเนล .....	31
5.4 ผลการทดสอบอัตราส่วนบัวของของโพลีเอทิลีน .....	33
5.5 ผลการทดสอบอัตราส่วนบัวของของโพลีเอไมด์ .....	33
5.6 ผลการทดสอบอัตราส่วนบัวของของเหล็กหล่อเบอร์ 30 .....	33
5.7 ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียหาย .....	61
ก.1 ข้อมูลการสอบเทียบแรงบิดเพลาชับชุดทดสอบตัวที่ 1 ทิศตามเข็มนาฬิกา .....	70
ก.2 ข้อมูลการสอบเทียบแรงบิดเพลาชับชุดทดสอบตัวที่ 1 ทิศทวนเข็มนาฬิกา .....	71
ก.3 ข้อมูลการสอบเทียบแรงบิดเพลาลูกขับชุดทดสอบตัวที่ 1 ทิศตามเข็มนาฬิกา .....	72
ก.4 ข้อมูลการสอบเทียบแรงบิดเพลาลูกขับชุดทดสอบตัวที่ 1 ทิศทวนเข็มนาฬิกา .....	73
ก.5 ข้อมูลการสอบเทียบแรงบิดเพลาชับชุดทดสอบตัวที่ 2 ทิศตามเข็มนาฬิกา .....	74
ก.6 ข้อมูลการสอบเทียบแรงบิดเพลาชับชุดทดสอบตัวที่ 2 ทิศทวนเข็มนาฬิกา .....	75
ก.7 ข้อมูลการสอบเทียบแรงบิดเพลาลูกขับชุดทดสอบตัวที่ 2 ทิศตามเข็มนาฬิกา .....	76
ก.8 ข้อมูลการสอบเทียบแรงบิดเพลาลูกขับชุดทดสอบตัวที่ 2 ทิศทวนเข็มนาฬิกา .....	77
ก.9 ข้อมูลการสอบเทียบแรงบิดเพลาชับชุดทดสอบตัวที่ 3 ทิศตามเข็มนาฬิกา .....	78
ก.10 ข้อมูลการสอบเทียบแรงบิดเพลาชับชุดทดสอบตัวที่ 3 ทิศทวนเข็มนาฬิกา .....	79
ก.11 ข้อมูลการสอบเทียบแรงบิดเพลาลูกขับชุดทดสอบตัวที่ 3 ทิศตามเข็มนาฬิกา .....	80
ก.12 ข้อมูลการสอบเทียบแรงบิดเพลาลูกขับชุดทดสอบตัวที่ 3 ทิศทวนเข็มนาฬิกา .....	81
ก.13 ข้อมูลการสอบเทียบแรงบิดเพลาชับชุดทดสอบตัวที่ 4 ทิศตามเข็มนาฬิกา .....	82
ก.14 ข้อมูลการสอบเทียบแรงบิดเพลาชับชุดทดสอบตัวที่ 4 ทิศทวนเข็มนาฬิกา .....	83
ก.15 ข้อมูลการสอบเทียบแรงบิดเพลาลูกขับชุดทดสอบตัวที่ 4 ทิศตามเข็มนาฬิกา .....	84
ก.16 ข้อมูลการสอบเทียบแรงบิดเพลาลูกขับชุดทดสอบตัวที่ 4 ทิศทวนเข็มนาฬิกา .....	85
ข.1 ผลการทดสอบการสึกหรอของเฟืองโพลีเอทิลีนที่สภาวะ SR = 0.25 ความเร็วรอบ 1,000 รอบต่อนาที .....	87

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญตาราง(ต่อ)

ตารางที่	หน้า
ข.2 ผลการทดสอบการสึกหรอของเฟืองโพลีเอทิลีนที่สภาวะ SR = 0.25 ความเร็วรอบ 1,500 รอบต่อนาที .....	87
ข.3 ผลการทดสอบการสึกหรอของเฟืองโพลีเอทิลีนที่สภาวะ SR = 0.25 ความเร็วรอบ 2,000 รอบต่อนาที .....	88
ข.4 ผลการทดสอบการสึกหรอของเฟืองโพลีเอทิลีนที่สภาวะ SR = 0.5 ความเร็วรอบ 1,000 รอบต่อนาที .....	88
ข.5 ผลการทดสอบการสึกหรอของเฟืองโพลีเอทิลีนที่สภาวะ SR = 0.5 ความเร็วรอบ 1,500 รอบต่อนาที .....	89
ข.6 ผลการทดสอบการสึกหรอของเฟืองโพลีเอทิลีนที่สภาวะ SR = 0.5 ความเร็วรอบ 2,000 รอบต่อนาที .....	89
ข.7 ผลการทดสอบการสึกหรอของเฟืองโพลีเอทิลีนที่สภาวะ SR = 0.75 ความเร็วรอบ 1,000 รอบต่อนาที .....	90
ข.8 ผลการทดสอบการสึกหรอของเฟืองโพลีเอทิลีนที่สภาวะ SR = 0.75 ความเร็วรอบ 1,500 รอบต่อนาที .....	90
ข.9 ผลการทดสอบการสึกหรอของเฟืองโพลีเอทิลีนที่สภาวะ SR = 0.75 ความเร็วรอบ 2,000 รอบต่อนาที .....	91
ข.10 ผลการทดสอบการสึกหรอของเฟืองโพลีเอไมต์ที่สภาวะ SR = 0.25 ความเร็วรอบ 1,000 รอบต่อนาที .....	91
ข.11 ผลการทดสอบการสึกหรอของเฟืองโพลีเอไมต์ที่สภาวะ SR = 0.25 ความเร็วรอบ 1,500 รอบต่อนาที .....	92
ข.12 ผลการทดสอบการสึกหรอของเฟืองโพลีเอไมต์ที่สภาวะ SR = 0.25 ความเร็วรอบ 2,000 รอบต่อนาที .....	92
ข.13 ผลการทดสอบการสึกหรอของเฟืองโพลีเอไมต์ที่สภาวะ SR = 0.5 ความเร็วรอบ 1,000 รอบต่อนาที .....	93
ข.14 ผลการทดสอบการสึกหรอของเฟืองโพลีเอไมต์ที่สภาวะ SR = 0.5 ความเร็วรอบ 1,500 รอบต่อนาที .....	93
ข.15 ผลการทดสอบการสึกหรอของเฟืองโพลีเอไมต์ที่สภาวะ SR = 0.5 ความเร็วรอบ 2,000 รอบต่อนาที .....	94

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้เผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญตาราง(ต่อ)

ตารางที่	หน้า
ข.16 ผลการทดสอบการลึกรอของเฟืองโพลีเอไมด์ที่สภาวะ SR = 0.75 ความเร็วรอบ 1,000 รอบต่อนาที .....	94
ข.17 ผลการทดสอบการลึกรอของเฟืองโพลีเอไมด์ที่สภาวะ SR = 0.75 ความเร็วรอบ 1,500 รอบต่อนาที .....	95
ข.18 ผลการทดสอบการลึกรอของเฟืองโพลีเอไมด์ที่สภาวะ SR = 0.75 ความเร็วรอบ 2,000 รอบต่อนาที .....	95
ข.19 ผลการทดสอบการลึกรอของเฟืองเหล็กหล่อเบอร์ 30 ที่สภาวะ SR = 0.25 ความเร็วรอบ 1,000 รอบต่อนาที .....	96
ข.20 ผลการทดสอบการลึกรอของเฟืองเหล็กหล่อเบอร์ 30 ที่สภาวะ SR = 0.25 ความเร็วรอบ 1,500 รอบต่อนาที .....	96
ข.21 ผลการทดสอบการลึกรอของเฟืองเหล็กหล่อเบอร์ 30 ที่สภาวะ SR = 0.25 ความเร็วรอบ 2,000 รอบต่อนาที .....	97
ข.22 ผลการทดสอบการลึกรอของเฟืองเหล็กหล่อเบอร์ 30 ที่สภาวะ SR = 0.5 ความเร็วรอบ 1,000 รอบต่อนาที .....	97
ข.23 ผลการทดสอบการลึกรอของเฟืองเหล็กหล่อเบอร์ 30 ที่สภาวะ SR = 0.5 ความเร็วรอบ 1,500 รอบต่อนาที .....	98
ข.24 ผลการทดสอบการลึกรอของเฟืองเหล็กหล่อเบอร์ 30 ที่สภาวะ SR = 0.5 ความเร็วรอบ 2,000 รอบต่อนาที .....	98
ข.25 ผลการทดสอบการลึกรอของเฟืองเหล็กหล่อเบอร์ 30 ที่สภาวะ SR = 0.75 ความเร็วรอบ 1,000 รอบต่อนาที .....	99
ข.26 ผลการทดสอบการลึกรอของเฟืองเหล็กหล่อเบอร์ 30 ที่สภาวะ SR = 0.75 ความเร็วรอบ 1,500 รอบต่อนาที .....	99
ข.27 ผลการทดสอบการลึกรอของเฟืองเหล็กหล่อเบอร์ 30 ที่สภาวะ SR = 0.75 ความเร็วรอบ 2,000 รอบต่อนาที .....	100
ข.28 เปรอ์เซ็นต์การลึกรอของโพลีออกซิเมทิลีนในรูปตัวแปร $\alpha$ และ $N^*$ .....	100
ข.29 เปรอ์เซ็นต์การลึกรอของโพลีเอไมด์ในรูปตัวแปร $\alpha$ และ $N^*$ .....	101
ข.30 เปรอ์เซ็นต์การลึกรอของเหล็กหล่อเบอร์ 30 ในรูปตัวแปร $\alpha$ และ $N^*$ .....	101

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญตาราง(ต่อ)

ตารางที่	หน้า
ค.1 ค่าสัมประสิทธิ์ a, b, c, d, e, f ของสมการการสีกหรือของโพลีอ็อกซิเมทิลีน .....	103
ค.2 ค่าสัมประสิทธิ์ a, b, c, d, e, f ของสมการการสีกหรือของโพลีเอไมด์ .....	103
ค.3 ค่าสัมประสิทธิ์ a, b, c, d, e, f ของสมการการสีกหรือของเหล็กหล่อเบอร์ 30 .....	104
ง.1 ความหยาบผิวของโพลีอ็อกซิเมทิลีน .....	106
ง.2 ความหยาบผิวของโพลีเอไมด์ .....	106
ง.3 ความหยาบผิวของเหล็กหล่อเบอร์ 30 .....	106
จ.1 ปริมาณธาตุองค์ประกอบของเหล็กหล่อสีเทา .....	109



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
3.1 ลักษณะรูปร่างอินโวลูตของเฟืองตรง	7
3.2 ลักษณะการขบกันขอบเฟือง	8
3.3 คุณสมบัติของเฟืองตรง	9
3.4 ลักษณะการรับแรงของเฟืองตรง	11
3.5 ความเสียหายเนื่องจากความล้าของเฟืองตรง	16
3.6 ความเสียหายแบบ pitting ที่บริเวณ Flank ของเฟืองตรง	16
3.7 ความเสียหายแบบ spalling ที่บริเวณ Flank ของเฟืองตรง	17
3.8 ความเสียหายจากการสึกหรอของเฟืองตรง	17
3.9 ความเสียหายแบบ scuffing ของเฟืองตรง	18
4.1 ชิ้นงานทดสอบความต้านทานแรงดึงโพลีเอไมด์ และโพลีเอทิลีน	19
4.2 ชิ้นงานทดสอบความต้านทานแรงดึงเหล็กหล่อเบอร์ 30	19
4.3 การทดสอบความต้านทานแรงดึงของโพลีเอทิลีน	20
4.4 การทดสอบความต้านทานแรงดึงเหล็กหล่อเบอร์ 30	20
4.5 ชิ้นทดสอบความแข็งแบบร็อคเวล	21
4.6 การทดสอบความแข็งแบบบริเนล	22
4.7 การทดสอบหาค่าอัตราส่วนปัวซอง	23
4.8 การทำความสะอาดเฟืองด้วยเครื่องล้างความถี่สูง	23
4.9 ตัวอย่างเฟืองที่ใช้ในการทดสอบ	24
4.10 การวัดโปรไฟล์เฟืองตรงด้วยเครื่อง CMM	24
4.11 แผนผังการตรวจวัดค่าต่างๆขณะทดสอบการสึกหรอของเฟืองตรง	25
4.12 การทดสอบการสึกหรอของเฟืองตรง	26
4.13 สอบเทียบเครื่องมือวัดความหยาบด้วยแท่งสอบเทียบ	27
4.14 การวัดค่าความหยาบผิวของเฟืองตรง	27
4.15 หลักการของเครื่องทดสอบแรงบิดเนื่องจากความเสียดทานของวัสดุ	28
4.16 การทดสอบหาสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน	29
5.1 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของโพลีเอทิลีน	30
5.2 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของโพลีเอไมด์	30
5.3 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของเหล็กหล่อเบอร์ 30	30

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนำไปใช้โดยไม่ได้รับอนุญาตเป็นการฝ่าฝืนกฎหมายลิขสิทธิ์  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.4 การทดสอบอัตราส่วนปัวซองของโพลีอ็อกซิเมทิลีน .....	32
5.5 การทดสอบอัตราส่วนปัวซองของโพลีเอไมด์ .....	32
5.6 การทดสอบอัตราส่วนปัวซองของเหล็กหล่อเบอร์ 30 .....	32
5.7 การลึกรวของเฟืองโพลีอ็อกซิเมทิลีน ที่สภาวะ SR = 0.25 , 1,000 รอบต่อนาที .....	34
5.8 การลึกรวของเฟืองโพลีอ็อกซิเมทิลีน ที่สภาวะ SR = 0.25 , 1,500 รอบต่อนาที .....	34
5.9 การลึกรวของเฟืองโพลีอ็อกซิเมทิลีน ที่สภาวะ SR = 0.25 , 2,000 รอบต่อนาที .....	34
5.10 การลึกรวของเฟืองโพลีอ็อกซิเมทิลีน ที่สภาวะ SR = 0.5 , 1,000 รอบต่อนาที .....	35
5.11 การลึกรวของเฟืองโพลีอ็อกซิเมทิลีน ที่สภาวะ SR = 0.5 , 1,500 รอบต่อนาที .....	35
5.12 การลึกรวของเฟืองโพลีอ็อกซิเมทิลีน ที่สภาวะ SR = 0.5 , 2,000 รอบต่อนาที .....	35
5.13 การลึกรวของเฟืองโพลีอ็อกซิเมทิลีน ที่สภาวะ SR = 0.75 , 1,000 รอบต่อนาที .....	36
5.14 การลึกรวของเฟืองโพลีอ็อกซิเมทิลีน ที่สภาวะ SR = 0.75 , 1,500 รอบต่อนาที .....	36
5.15 การลึกรวของเฟืองโพลีอ็อกซิเมทิลีน ที่สภาวะ SR = 0.75 , 2,000 รอบต่อนาที .....	36
5.16 การลึกรวของเฟืองโพลีเอไมด์ ที่สภาวะ SR = 0.25 , 1,000 รอบต่อนาที .....	37
5.17 การลึกรวของเฟืองโพลีเอไมด์ ที่สภาวะ SR = 0.25 , 1,500 รอบต่อนาที .....	37
5.18 การลึกรวของเฟืองโพลีเอไมด์ ที่สภาวะ SR = 0.25 , 2,000 รอบต่อนาที .....	37
5.19 การลึกรวของเฟืองโพลีเอไมด์ ที่สภาวะ SR = 0.5 , 1,000 รอบต่อนาที .....	38
5.20 การลึกรวของเฟืองโพลีเอไมด์ ที่สภาวะ SR = 0.5 , 1,500 รอบต่อนาที .....	38
5.21 การลึกรวของเฟืองโพลีเอไมด์ ที่สภาวะ SR = 0.5 , 2,000 รอบต่อนาที .....	38
5.22 การลึกรวของเฟืองโพลีเอไมด์ ที่สภาวะ SR = 0.75 , 1,000 รอบต่อนาที .....	39
5.23 การลึกรวของเฟืองโพลีเอไมด์ ที่สภาวะ SR = 0.75 , 1,500 รอบต่อนาที .....	39
5.24 การลึกรวของเฟืองโพลีเอไมด์ ที่สภาวะ SR = 0.75 , 2,000 รอบต่อนาที .....	39
5.25 การลึกรวของเฟืองเหล็กหล่อเบอร์ 30 ที่สภาวะ SR = 0.25 , 1,000 รอบต่อนาที .....	40
5.26 การลึกรวของเฟืองเหล็กหล่อเบอร์ 30 ที่สภาวะ SR = 0.25 , 1,500 รอบต่อนาที .....	40
5.27 การลึกรวของเฟืองเหล็กหล่อเบอร์ 30 ที่สภาวะ SR = 0.25 , 2,000 รอบต่อนาที .....	40
5.28 การลึกรวของเฟืองเหล็กหล่อเบอร์ 30 ที่สภาวะ SR = 0.5 , 1,000 รอบต่อนาที .....	41
5.29 การลึกรวของเฟืองเหล็กหล่อเบอร์ 30 ที่สภาวะ SR = 0.5 , 1,500 รอบต่อนาที .....	41
5.30 การลึกรวของเฟืองเหล็กหล่อเบอร์ 30 ที่สภาวะ SR = 0.5 , 2,000 รอบต่อนาที .....	41
5.31 การลึกรวของเฟืองเหล็กหล่อเบอร์ 30 ที่สภาวะ SR = 0.75 , 1,000 รอบต่อนาที .....	42

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ในการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.32 การศึกษาของเฟืองเหล็กหล่อเบอร์ 30 ที่สภาวะ $SR = 0.75$ , 1,500 รอบต่อนาที .....	42
5.33 การศึกษาของเฟืองเหล็กหล่อเบอร์ 30 ที่สภาวะ $SR = 0.75$ , 2,000 รอบต่อนาที .....	42
5.34 กราฟแสดงผลของความเร็วรอบต่อการสึกหรอของโพลีเอทิลีน .....	44
5.35 กราฟแสดงผลของอัตราส่วนความเค้นต่อการสึกหรอของโพลีเอทิลีน .....	45
5.36 กราฟแสดงผลของความเร็วรอบต่อการสึกหรอของโพลีเอไมด์ .....	46
5.37 กราฟแสดงผลของอัตราส่วนความเค้นต่อการสึกหรอของโพลีเอไมด์ .....	47
5.38 กราฟแสดงผลของความเร็วรอบต่อการสึกหรอของเหล็กหล่อเบอร์ 30 .....	48
5.39 กราฟแสดงผลของอัตราส่วนความเค้นต่อการสึกหรอของเหล็กหล่อเบอร์ 30 .....	49
5.40 กราฟแสดงเปอร์เซ็นต์การสึกหรอของโพลีเอทิลีนในรูปตัวแปร $\alpha$ และ $N^*$ .....	50
5.41 กราฟแสดงเปอร์เซ็นต์การสึกหรอของโพลีเอไมด์ในรูปตัวแปร $\alpha$ และ $N^*$ .....	51
5.42 กราฟแสดงเปอร์เซ็นต์การสึกหรอของเหล็กหล่อเบอร์ 30 ในรูปตัวแปร $\alpha$ และ $N^*$ .....	51
5.43 การศึกษาของโปรไฟล์เฟืองโพลีเอทิลีน $SR = 0.75$ , 1,000 รอบต่อนาที .....	52
5.44 การศึกษาของโปรไฟล์เฟืองโพลีเอทิลีน $SR = 0.75$ , 1,500 รอบต่อนาที .....	52
5.45 การศึกษาของโปรไฟล์เฟืองโพลีเอทิลีน $SR = 0.75$ , 2,000 รอบต่อนาที .....	53
5.46 การศึกษาของโปรไฟล์เฟืองโพลีเอไมด์ $SR = 0.75$ , 1,000 รอบต่อนาที .....	53
5.47 การศึกษาของโปรไฟล์เฟืองโพลีเอไมด์ $SR = 0.75$ , 1,500 รอบต่อนาที .....	54
5.48 การศึกษาของโปรไฟล์เฟืองโพลีเอไมด์ $SR = 0.75$ , 2,000 รอบต่อนาที .....	54
5.49 การศึกษาของโปรไฟล์เฟืองเหล็กหล่อเบอร์ 30 $SR = 0.75$ , 1,000 รอบต่อนาที .....	55
5.50 การศึกษาของโปรไฟล์เฟืองเหล็กหล่อเบอร์ 30 $SR = 0.75$ , 1,500 รอบต่อนาที .....	55
5.51 การศึกษาของโปรไฟล์เฟืองเหล็กหล่อเบอร์ 30 $SR = 0.75$ , 2,000 รอบต่อนาที .....	56
5.52 เปรียบเทียบเส้นกราฟโมเดลการสึกหรอและผลการทดสอบของเฟืองโพลีเอทิลีน .....	57
5.53 เปรียบเทียบค่าเปอร์เซ็นต์การสึกหรอจากโมเดลและผลการทดสอบของเฟือง โพลีเอทิลีน ( $R^2 = 99.57$ ) .....	57
5.54 เปรียบเทียบเส้นกราฟโมเดลการสึกหรอและผลการทดสอบของเฟืองโพลีเอไมด์ .....	58
5.55 เปรียบเทียบค่าเปอร์เซ็นต์การสึกหรอจากโมเดลและผลการทดสอบของเฟือง โพลีเอไมด์ ( $R^2 = 96.58$ ) .....	58

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.56 เปรียบเทียบเส้นกราฟโมเดลการสึกหรอและผลการทดสอบของเฟือง เหล็กหล่อเบอร์30.....	59
5.57 เปรียบเทียบค่าเปอร์เซ็นต์การสึกหรอจากโมเดลและผลการทดสอบของเฟืองเหล็กหล่อ เบอร์30 ( $R^2 = 99.72$ ).....	59
5.58 ความหยาบผิวของโพลีเอทิลีนที่อัตราส่วนความเค้นต่างๆ.....	60
5.59 ความหยาบผิวของโพลีเอไมด์ที่อัตราส่วนความเค้นต่างๆ.....	60
5.60 ความหยาบผิวของเหล็กหล่อเบอร์ 30 ที่อัตราส่วนความเค้นต่างๆ.....	60
5.61 แรงบิดเนื่องจากความเสียหายของดัลบลูกปืนเครื่องทดสอบ.....	62
5.62 ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียหายของโพลีเอทิลีน โพลีเอไมด์และ เหล็กหล่อเบอร์30.....	62
ก.1 เครื่องทดสอบการสึกหรอของเฟืองตรง .....	68
ก.2 การชั่งมวลที่ใช้ในการสอบเทียบแรงบิดของเครื่องทดสอบการสึกหรอของเฟืองตรง .....	69
ก.3 การสอบเทียบแรงบิดของเครื่องทดสอบการสึกหรอของเฟืองตรง .....	69
ก.4 กราฟแรงบิดและความเครียดของการสอบเทียบแรงบิดเพลลาขับ ชุดทดสอบตัวที่1 ทิศตามเข็มนาฬิกา .....	70
ก.5 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดและค่าความเครียดของการสอบเทียบแรงบิดเพลลาขับ ชุดทดสอบตัวที่1 ทิศทวนเข็มนาฬิกา .....	71
ก.6 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดและค่าความเครียดของการสอบเทียบแรงบิดเพลลาถูก ขับชุดทดสอบตัวที่1 ทิศตามเข็มนาฬิกา .....	72
ก.7 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดและค่าความเครียดของการสอบเทียบแรงบิดเพลลาถูก ขับชุดทดสอบตัวที่1 ทิศทวนเข็มนาฬิกา .....	73
ก.8 กราฟแรงบิดและความเครียดของการสอบเทียบแรงบิดเพลลาขับชุดทดสอบตัวที่ 2 ทิศตาม เข็มนาฬิกา .....	74
ก.9 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดและค่าความเครียดของการสอบเทียบแรงบิดเพลลาขับ ชุดทดสอบตัวที่2 ทิศทวนเข็มนาฬิกา .....	75
ก.10 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดและค่าความเครียดของการสอบเทียบแรงบิดเพลลาถูก ขับชุดทดสอบตัวที่ 2 ทิศตามเข็มนาฬิกา .....	76

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
ก.11 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดและค่าความเครียดของการสอบเทียบแรงบิดเพลลาถูก ซึบชุดทดสอบตัวที่ 2 ทิศทวนเข็มนาฬิกา .....	77
ก.12 กราฟแรงบิดและความเครียดของการสอบเทียบแรงบิดเพลลาซึบชุดทดสอบตัวที่3 ทิศ ตามเข็มนาฬิกา .....	78
ก.13 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดและค่าความเครียดของการสอบเทียบแรงบิดเพลลาซึบ ชุดทดสอบตัวที่ 3 ทิศทวนเข็มนาฬิกา .....	79
ก.14 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดและค่าความเครียดของการสอบเทียบแรงบิดเพลลาถูก ซึบชุดทดสอบตัวที่ 3 ทิศตามเข็มนาฬิกา .....	80
ก.15 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดและค่าความเครียดของการสอบเทียบแรงบิดเพลลาถูก ซึบชุดทดสอบตัวที่ 3 ทิศทวนเข็มนาฬิกา .....	81
ก.16 กราฟแรงบิดและความเครียดของการสอบเทียบแรงบิดเพลลาซึบชุดทดสอบตัวที่4 ทิศ ตามเข็มนาฬิกา .....	82
ก.17 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดและค่าความเครียดของการสอบเทียบ แรงบิดเพลลาซึบชุดทดสอบตัวที่ 4 ทิศทวนเข็มนาฬิกา .....	83
ก.18 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดและค่าความเครียดของการสอบเทียบแรงบิดเพลลาถูก ซึบชุดทดสอบตัวที่ 4 ทิศตามเข็มนาฬิกา .....	84
ก.19 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดและค่าความเครียดของการสอบเทียบแรงบิดเพลลาถูก ซึบชุดทดสอบตัวที่ 4 ทิศทวนเข็มนาฬิกา .....	85
จ.1 สูตรโครงสร้างทางเคมีของโพลีออกซีเมทิลีน .....	108
จ.2 สูตรโครงสร้างทางเคมีของโพลีเอไมด์ .....	108
ฉ.1 ลักษณะรอยสีกรอของเฟืองอ็อกซีเมทิลีน (กำลังขยาย 15 เท่า).....	111
ฉ.2 ลักษณะรอยสีกรอของเฟืองโพลีเอไมด์ (กำลังขยาย 15 เท่า).....	111
ฉ.3 ลักษณะรอยสีกรอของเฟืองเหล็กหล่อเบอร์ 30 (กำลังขยาย 15 เท่า).....	112
ช.1 สูจิบัตรการประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 18.....	114
ช.2 บทคัดย่อบทความที่ได้รับการตีพิมพ์ในการประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรม เครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 18 .....	115

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## รายการสัญลักษณ์

อัตราส่วนปัวซอง	$\nu$
ความต้านทานแรงดึง	$S_{ut}$
โมดูล	$m$
เส้นผ่านศูนย์กลางพิช	$d$
จำนวนฟัน	$N_G$
Diametral pitch	$P$
Circular pitch	$p$
Addendum	$a$
Dedendum	$b$
Clearance	$c$
ผ่านศูนย์กลางภายนอกของยอดฟัน	$D_o$
เส้นผ่านศูนย์กลางของโคน	$D_r$
Whole depth	$h_t$
Working depth	$h_k$
ความหนาฟัน	$t$
เบ้คเลซ	$B$
Face width	$F$
Center distance	$C$
Pressure angle	$\phi$
Base circle	$D_b$
Contact ratio	$m_G$
ความเร็วเชิงเส้นที่เส้นพิช	$v_t$
อัตราส่วนความเร็ว	$VR$
ความเร็วรอบ	$n$
อัตราส่วนเฟือง	$m_G$
แรงตามแนวรัศมี	$W_r$
แรงตามแนวตั้งฉาก	$W_n$
กำลัง	$P$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## รายการสัญลักษณ์(ต่อ)

แรงบิด	T
ความเค้นกด	$\sigma_c$
อัตราส่วนความเค้น	SR
ความลึกของการสึกหรอ	w
จำนวนรอบของการใช้งาน	N



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

เฟืองตรงเป็นชิ้นส่วนพื้นฐานในระบบส่งกำลังทั้งขนาดเล็กและขนาดใหญ่ เฟืองมีหน้าที่ในการส่งถ่ายกำลังและการเคลื่อนที่ วัสดุที่ใช้ทำเฟืองมี 2 กลุ่มหลักๆ คือ 1) โลหะกลุ่มเหล็ก (Ferrous metal) และ 2) โลหะนอกกลุ่มเหล็ก (Non-ferrous metal) โลหะกลุ่มเหล็กที่นิยมใช้ทำเฟืองได้แก่ AISI 4140, AISI 4340 ซึ่งเป็นเหล็กทำอะไหล่ (Machinery steel) และเหล็กหล่อ (Cast iron) ที่นิยมใช้ทำเฟืองคือ ASTM 20, ASTM 30 และ ASTM 40 ส่วนโลหะนอกกลุ่มเหล็กได้แก่ อลูมิเนียม เช่น 7075-T6, 2024-T4 บรอนซ์ และโพลีเมอร์ เป็นต้น

เฟืองที่ทำจากวัสดุกลุ่มเหล็กต้องได้รับการออกแบบและผ่านกระบวนการผลิต การอบชุบผิวแข็งที่เหมาะสมรวมทั้งการดูแลเรื่องการหล่อลื่นและบำรุงรักษาอย่างถูกวิธีเพื่อป้องกันความเสียหายที่อาจเกิดกับเฟืองจนทำให้เฟืองตรงเสียหายได้ ความเสียหายที่เกิดกับเฟืองที่ทำจากวัสดุกลุ่มเหล็กโดยส่วนใหญ่คือ การแตกเนื่องจากความล้า (Fatigue) ที่โคนฟัน การเกิดความเสียหายแบบหลุม (Pitting) ที่ผิวฟันเฟือง และการสึกหรอ (Wear) ของฟันเฟือง ซึ่งส่งผลกระทบต่ออายุการใช้งานและประสิทธิภาพการส่งถ่ายกำลังของเฟือง

วัสดุกลุ่มโพลีเมอร์มีแนวโน้มที่จะถูกนำมาใช้แทนวัสดุกลุ่มเหล็กมากขึ้น เนื่องจากแนวโน้มความต้องการเครื่องมืออุปกรณ์ที่มีขนาดเล็กกะทัดรัด รวมทั้งกระแสการประหยัดพลังงานทั้งในแง่การบริโภคและกระบวนการผลิต ทำให้มีการเลือกใช้วัสดุทางเลือกที่มีความแข็งแรง มีน้ำหนักเบา ประสิทธิภาพสูงและต้นทุนการผลิตต่ำเพิ่มมากขึ้น อย่างไรก็ตามข้อมูลจำเพาะและคุณสมบัติของวัสดุโพลีเมอร์ยังไม่เป็นที่แพร่หลายเนื่องจากวัสดุบางชนิดเป็นความลับทางการค้าของผู้ผลิตเมทัลพลาสติกแต่ละราย ทำให้ฐานข้อมูลเกี่ยวกับคุณสมบัติของวัสดุโพลีเมอร์ยังมีน้อยแตกต่างจากวัสดุกลุ่มเหล็ก ทำให้การประยุกต์ใช้งานวัสดุในกลุ่มโพลีเมอร์ยังไม่กว้างขวางเท่าที่ควร เฟืองตรงที่มีน้ำหนักเบา มีความเฉื่อยต่ำ ประสิทธิภาพสูง สามารถผลิตได้จากวัสดุโพลีเมอร์ เช่น โพลีออกซีเมทิลีนและโพลีเอไมด์ ซึ่งใช้งานมากในอุปกรณ์ที่ต้องการส่งผ่านการเคลื่อนที่ที่ต้องการความแม่นยำ กำลังและความเร็วรอบไม่สูงมากนัก เช่น เครื่องถ่ายเอกสาร เครื่องพิมพ์ อุปกรณ์ควบคุมตำแหน่ง เป็นต้น

## 1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มุ่งศึกษาถึงคุณลักษณะการสึกหรอของเฟืองตรงขนาดเล็กซึ่งใช้งานในระบบส่งกำลังที่ต้องการความแม่นยำสูง ซึ่งในการศึกษานี้เน้นศึกษาการสึกหรอของเฟืองตรงขนาดเล็กซึ่งทำจากวัสดุในกลุ่มโพลีเมอร์โดยเลือกศึกษาวัสดุ 2 ชนิด คือ โพลีออกซีเมทิลีนและโพลีเอไมด์ และยังได้ทำการศึกษาเปรียบเทียบกับ การสึกหรอของเฟืองตรงขนาดเล็กซึ่งทำจากวัสดุในกลุ่มเหล็กอีกด้วยโดยเลือกใช้เหล็กหล่อเบอร์ 30

## 1.3 สมมติฐานของการศึกษา

การสึกหรอเป็นความเสียหายประเภทหนึ่งที่เกิดขึ้นได้บ่อยในเฟืองที่ทำจากวัสดุทั้งในกลุ่มเหล็ก (Ferrous metal) และนอกกลุ่มเหล็ก (Non-ferrous) เนื่องจากลักษณะของการรับแรงของผิวเฟืองนั้นมีลักษณะการสัมผัส (Contact) แบบกลิ้ง (Rolling) และแบบถู (Sliding) ตลอดระยะเวลาของการใช้งาน ซึ่งอาจทำให้เกิดการหลุดร่อนเป็นหลุมลึกและการสึกหรอของผิวหน้าเฟือง โดยความเสียหายที่เกิดขึ้นจะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับความสามารถในการทนทานต่อการรับแรงในลักษณะดังกล่าวของวัสดุที่ทำเฟืองเอง และสภาพการใช้งาน คุณลักษณะทางกลของวัสดุซึ่งมักถูกใช้เป็นเกณฑ์เบื้องต้นในการออกแบบอาจมีส่วนสำคัญในการต้านทานต่อการเกิดความเสียหายดังกล่าว อีกทั้งสภาพการใช้งานก็เป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่มีส่วนในการเกิดความเสียหายของเฟือง เช่น แรงบิด ความเร็วรอบในการใช้งาน ความผิดพลาดในการประกอบเฟืองเป็นต้น วัสดุในกลุ่มโพลีเมอร์มีคุณสมบัติทางกลด้านความแข็งแรงต่ำกว่าเหล็กมาก แต่มีข้อได้เปรียบคือน้ำหนักเบา จึงเหมาะกับระบบส่งกำลังขนาดเล็กที่ต้องการความกะทัดรัด ความแม่นยำสูง ดูแลรักษาได้ง่าย อีกทั้งยังทนทานต่อสภาพการใช้งานในสภาวะที่มีสารเคมีและสภาวะแวดล้อมแบบต่างได้ดีกว่าเหล็ก คุณลักษณะการสึกหรอของวัสดุโพลีเมอร์อาจแตกต่างจากวัสดุกลุ่มเหล็กเมื่อพิจารณาถึงความแตกต่างทางคุณสมบัติทางกายภาพและโครงสร้างทางเคมีของวัสดุ

## 1.4 ทฤษฎีหรือแนวความคิดที่ใช้ในการวิจัย

การศึกษาด้านการสึกหรอของเฟืองตรงนั้นอาจทำได้ทั้งในรูปแบบการศึกษาเชิงวัสดุและการศึกษาเฟืองทั้งชิ้น ในการศึกษาเชิงวัสดุที่ทำการกันโดยส่วนใหญ่มักเป็นการศึกษาการสึกหรอโดยใช้เครื่องทดสอบแบบ Pin on disk ซึ่งสามารถอธิบายการเกิดการสึกหรอของเฟืองได้เพียงบางส่วน เนื่องจากในการใช้งานจริงปัจจัยของตัวเฟืองเองอาจมีส่วนในการเกิดการสึกหรอและ

ความเสียหายอื่นๆได้เช่นกันเช่น โปริไฟล์ที่เปลี่ยนไปเนื่องจากการสึกหรอ สัมประสิทธิ์ความเสียดทาน ลักษณะการเคลื่อนที่ของเฟืองแบบแบบกลิ้งและแบบถูเป็นต้น ดังนั้นการศึกษาศึกษาการสึกหรอของเฟืองทั้งชิ้นอาจให้ข้อมูลการสึกหรอที่มีประโยชน์มากขึ้น อย่างไรก็ตามปัจจัยที่มีผลต่อการสึกหรอนั้นมีมากและมีความซับซ้อน ข้อมูลเกี่ยวกับคุณสมบัติของวัสดุด้านการสึกหรอก็ยังไม่แพร่หลายมากนัก และบางปัจจัยก็ไม่อาจจำลองไว้ในการศึกษาได้ทั้งหมด ขอบเขตของการศึกษานี้จึงเน้นเฉพาะการศึกษาพฤติกรรมการสึกหรอของเฟืองตรงที่ใช้งานในระบบส่งถ่ายกำลังขนาดเล็กในสภาวะไร้สารหล่อลื่นโดยการทดลองการสึกหรอของเฟืองทั้งชิ้น

## 1.5 ขอบเขตการวิจัย

ในงานวิจัยนี้มุ่งศึกษาถึงคุณลักษณะการสึกหรอของเฟืองตรงที่ทำจากวัสดุโพลีเมอร์ 2 ชนิด คือ โพลีเอทิลีนและโพลีเอไมด์ และยังได้ทำการศึกษาร่วมกับการสึกหรอของเฟืองตรงซึ่งทำจากวัสดุในกลุ่มเหล็กโดยเลือกใช้เหล็กหล่อเบอร์ 30 เฟืองตรงที่ใช้ในการทดลองเพื่อศึกษาการสึกหรอใช้วิธีการกัดโดยใช้มีดกัดเฟือง โดยจำกัดขนาดและชนิดของเฟืองที่ใช้ในการศึกษาเป็นเฟืองแบบฟันละเอียด (Fine pitch) ความลึกเต็ม (Full depth) ที่มีโปริไฟล์เป็นแบบอินโวลูต มีมุมความดัน (Pressure angle) เท่ากับ 20 องศาและโมดูล (Module) เท่ากับ 1.25 ในการทดลองนี้จำนวนฟันของเฟืองแต่ละชนิดที่ใช้ในการศึกษากำหนดให้เท่ากับ 17 ฟัน และความกว้างของฟันเท่ากันทุกวัสดุคือ 3 มิลลิเมตร ศึกษาผลกระทบของความเร็รรอบ 3 ค่าคือ 1,000 1,500 และ 2,000 รอบต่อนาที แรงบิดที่ใช้ในการศึกษามี 3 ระดับคือ 25% 50% และ 75% ของความต้านทานแรงดึงวัสดุแต่ละชนิด จำนวนครั้งของการทดสอบของเฟืองทั้ง 3 ชนิดเท่ากันคือ 5 ล้านรอบ การตรวจวัดการสึกหรอใช้วิธีวัดโปริไฟล์และความลึกของรอยสึกหรอโดยใช้เครื่อง CMM (Coordinate Measurement Machine) ซึ่งมีความละเอียดในการวัด 0.01 ไมครอนและทำการวัดหาค่าความหยาบและสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของผิวเฟืองแต่ละชนิดด้วย อย่างไรก็ตามเนื่องจากในความเป็นจริงลักษณะการใช้งานเฟืองตรงที่ทำจากเหล็กแตกต่างจากเฟืองตรงที่ทำจากโพลีเมอร์ กล่าวคือการใช้งานเฟืองตรงที่ทำจากโพลีเมอร์ส่วนใหญ่ไม่ต้องอาศัยสารหล่อลื่นเนื่องจากตัววัสดุเองมีคุณสมบัติด้านการหล่อลื่นในตัวเองอยู่แล้ว ซึ่งแตกต่างจากเฟืองตรงที่ทำจากเหล็กที่ต้องมีสารหล่อลื่นผิวสัมผัส เพื่อให้สามารถเปรียบเทียบแนวโน้มและความแตกต่างของคุณลักษณะการสึกหรอแบบไร้การหล่อลื่นระหว่างวัสดุใน 2 กลุ่มนี้ได้ดังนั้นในการศึกษานี้จะทำการทดลองการใช้งานเฟืองในสภาวะไม่มีสารหล่อลื่น ผลที่ได้จากการทดลองจะนำมาใช้หาความสัมพันธ์เพื่อเป็นโมเดลในการทำนายการสึกหรอของเฟืองตรง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 1.6 ขั้นตอนของการศึกษา

วัสดุที่ใช้ทำเฟืองเป็นปัจจัยหนึ่งที่ต้องคำนึงถึงในการศึกษาการสึกหรอของเฟือง เนื่องจากวัสดุแต่ละชนิดอาจมีคุณสมบัติที่แตกต่างกันอย่างมาก เช่น คุณสมบัติทางกล คุณสมบัติทางเคมี เป็นต้น ในการศึกษาสามารถแบ่งขั้นตอนการศึกษาออกเป็น 4 ขั้นตอนคือ ขั้นที่ 1) การศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพของวัสดุทั้ง 3 ชนิด อันได้แก่ โพลีเอไมด์ โพลีเอทิลีน เทฟลอน และ เหล็กหล่อสีเทาซึ่งในการศึกษานี้เลือกใช้เบอร์เทียบเท่ากับมาตรฐาน ASTM เบอร์ 30 ขั้นที่ 2) การทดสอบหาคุณสมบัติทางกลของวัสดุทั้ง 3 ชนิดโดยการเตรียมชิ้นทดสอบแล้วทดสอบตามมาตรฐานการทดสอบ เช่นการทดสอบแรงดึง เพื่อหาค่าความต้านทานแรงดึง การทดสอบความสม่ำเสมอของวัสดุโดยการทดสอบความแข็งแบบร็อคเวลล์สำหรับวัสดุโพลีเมอร์และการทดสอบความแข็งแบบบริเนลล์สำหรับวัสดุที่เป็นโลหะ การทดสอบหาค่าอัตราส่วนปัวซอง ซึ่งมีผลต่อความถูกต้องของการคำนวณความเค้นกดที่ผิวเฟือง ขั้นที่ 3) การเตรียมชิ้นงานเฟืองเพื่อใช้ในการทดสอบการสึกหรอจากวัสดุทั้ง 3 ชนิด และขั้นที่ 4) การทดสอบการสึกหรอของเฟือง และการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของปัจจัยที่มีผลต่อการสึกหรอ

## วรรณกรรมปริทรรศน์

การศึกษาเกี่ยวกับเรื่องเฟืองซึ่งเป็นแขนงหนึ่งของกลศาสตร์ของแข็งที่มีผู้ทำการศึกษาและวิจัยด้านนี้อยู่ไม่น้อย เช่นการศึกษาปัญหาด้าน Contact การศึกษาการเกิดความเสียหายแบบต่างๆของเฟืองซึ่งผลิตจากวัสดุวิศวกรรมต่างๆ การศึกษากระบวนการผลิตเฟืองแบบใหม่ เป็นต้น ในการศึกษาด้านความเสียหายของเฟืองนั้นมีความเกี่ยวข้องกับปัญหา Contact Mechanics เป็นอย่างมาก J.R. Barber และ M. Ciavarella ได้ทำการสำรวจเกี่ยวกับปัญหาด้าน Contact mechanic และแบ่งปัญหานี้ออกเป็นหมวดต่างๆที่กำลังมีการศึกษาวิจัย เช่น ปัญหาที่เกี่ยวกับความเสียดทาน (Frictional problems) ความไม่เสถียรทางพลวัต (Dynamic instabilities) ปัญหาความไม่สม่ำเสมอในคุณสมบัติของวัสดุ (Anisotropic materials) ปัญหา Elastodynamic contact ปัญหาด้าน Surface roughness และ Thermoelastic contact เป็นต้น ลักษณะของผิวสัมผัสโดยปกติแล้วจะมีความหยาบ ซึ่งมักทำให้การสัมผัสเกิดเป็นจุดๆ หรือเป็นพื้นที่บริเวณเล็กๆ เท่านั้น และยังไว (Sensitive) ต่อการเปลี่ยนรูปร่างของผิวหน้าสัมผัส และการเสียรูปเนื่องจากความร้อน (Thermoelastic distortion) อีกด้วย และหากการสัมผัสนั้นคำนึงถึงผลของความเสียดทานด้วยแล้วก็จะทำให้รูปแบบของปัญหามีความซับซ้อนมากขึ้น รูปแบบของความเสียดทานที่ง่ายที่สุดคือ ความเสียดทานแบบคูลอมบ์ (Coulomb friction) ซึ่งทำให้สามารถแบ่งลักษณะของการสัมผัสที่มีความเสียดทานออกเป็น 2 แบบคือ การสัมผัสแบบ Stick เมื่อไม่มีการเคลื่อนที่สัมผัสระหว่างผิวสัมผัส นั่นคือ แรงในแนวเส้นสัมผัสน้อยกว่าแรงเสียดทานและการสัมผัสแบบ Slip เมื่อมีการเคลื่อนที่สัมผัสระหว่างผิวสัมผัส นั่นคือ แรงในแนวเส้นสัมผัสเท่ากับแรงเสียดทานและมีทิศตรงกันข้ามกับการเคลื่อนที่ [1] อาจกล่าวได้ว่าการศึกษาและพัฒนาเกี่ยวกับปัญหาด้าน Contact นี้มีรากฐานมาจากผลงานของHertz ซึ่งได้เสนอสมการสำหรับการสัมผัสแบบไร้แรงเสียดทานของผิวสัมผัสที่มีโปรไฟล์แบบวงรี (Ellipsoidal profile) ในปี คศ. 1882 จนกระทั่งปัจจุบันสมการดังกล่าวก็ยังคงถูกใช้ในการออกแบบเกี่ยวกับ Elastic contact

การศึกษาเกี่ยวกับความเสียหายของเฟืองได้แก่ การศึกษาการเกิดความเสียหายเนื่องจากความล้าของผิวเฟือง การเสียหายเนื่องจากความล้าที่โคนฟัน การสึกหรอของเฟือง เป็นต้น ความเสียหายของผิวเฟืองยังไม่มีบทนิยามที่แน่ชัด การศึกษาของ Yan Ding และ Neville F. Rieger ได้แยกความแตกต่างระหว่างการศึกษาการเกิดความเสียหายแบบหลุมที่ผิวซึ่งเกิดจากความบกพร่องที่ผิว (Surface defect) ซึ่งเรียกว่า Pitting และความเสียหายซึ่งเกิดจากการขยายตัวของรอยแตกใต้ผิว (Subsurface crack) ซึ่งเรียกว่า Spalling พบว่าความแตกต่างของ Pitting และ Spalling อยู่ที่ความลึกของหลุม คือ ความลึกมากที่สุดของการเกิด Pitting เท่ากับความหนาของชั้นชุบผิวแข็ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยปกติจะประมาณ 10 ไมครอน ในขณะที่หลุมที่เกิดจาก Spalling จะลึกกว่าซึ่งอาจอยู่ในช่วง 20 ถึง 100 ไมครอน [2] B.R.Höhn และ K. Michaelis ทำการศึกษาเชิงทดสอบผลกระทบของ อุณหภูมิน้ำมันที่มีต่อการเสียหายของเฟือง โดยพิจารณาถึงความเสียหายด้าน การสึกหรอ การ เกิด Scuffing และการเกิด Pitting [3] การศึกษาคุณสมบัติของเฟืองที่ทำจากวัสดุอื่น ๆ นอกจาก โลหะนั้นยังมีค่อนข้างน้อย และส่วนใหญ่ก็จะเน้นศึกษาเฉพาะวัสดุวิศวกรรมเช่นพลาสติกซึ่งเริ่มมี บทบาทในการดำรงชีวิตของมนุษย์มากขึ้น Masaya Kurokawa และคณะได้ทำการศึกษา ประสิทธิภาพของเฟืองที่ทำจากพลาสติก คือ โพลีเอไมด์ 12 เสริมเส้นใยคาร์บอน (Carbon fiber reinforced Polyamide 12) โดยทำการศึกษาทั้งในด้านการสึกหรอและด้านความล้า พบว่าเฟืองที่ ทำจากโพลีเอไมด์ 12 เสริมเส้นใยคาร์บอนมีคุณสมบัติด้านการสึกหรอที่ดีมากหากมีจารบีเป็นสารหล่อลื่น และพบว่ายังมีค่าความแข็งแรงสูงที่สุดในกลุ่มของโพลีเอไมด์ [4] และยังได้ทำการศึกษา ลักษณะเดียวกันนี้กับวัสดุ โพลีเอเธอร์อีเธอร์คีโตนเสริมเส้นใยคาร์บอน (Carbon fiber reinforced PEEK) พบว่า คุณสมบัติด้านการสึกหรอของโพลีเอเธอร์อีเธอร์คีโตนเสริมเส้นใยคาร์บอนนั้น ขึ้นอยู่กับลักษณะการทดสอบและเฟืองที่นำมาขบด้วยกัน รวมทั้งสารหล่อลื่นที่ใช้ด้วย [5]



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 3

# หลักการและทฤษฎี

### 3.1 ทฤษฎีเบื้องต้นเกี่ยวกับเฟือง

เฟืองเป็นชิ้นส่วนที่ใช้ในการส่งผ่านการกำลังและการเคลื่อนที่แบบหมุน โดยติดอยู่กับเพลาส่งกำลังโดยมีระยะห่างระหว่างเฟืองแต่ละตัวที่ค่อนข้างแน่นอน เฟืองมีลักษณะเป็นซี่ๆ ที่เรียกว่าฟันเฟือง (Teeth) ซึ่งมีรูปทรงที่มีลักษณะโค้งหรือโปรไฟล์ แบบ อินโวลูต (Involute) เพื่อให้การส่งผ่านความเร็วรอบระหว่างตัวขับและตัวตามเป็นไปอย่างราบเรียบไม่เกิดการกระแทก ระหว่างฟันแต่ละซี่ขณะขบกัน กำลังงานที่ส่งผ่านระหว่างเฟืองแต่ละคู่และความเร็วรอบยังมีความสัมพันธ์กับจำนวนฟันอีกด้วย เฟืองที่ใช้งานกันอย่างกว้างขวางคือเฟืองตรงที่มีฟันแบบอินโวลูตความลึกเต็ม ลักษณะรูปร่างของเฟืองแบบนี้เป็นดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 ลักษณะรูปร่างอินโวลูตของเฟืองตรง

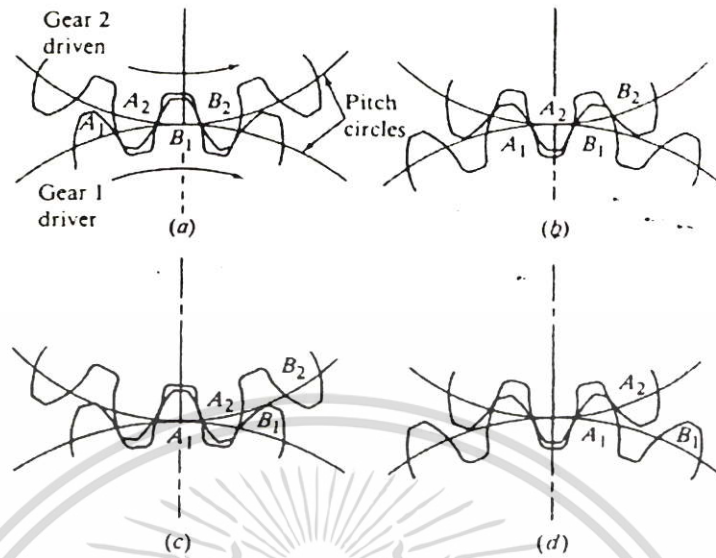
และเมื่อเฟืองตรงขบกันจะมีจุดที่เฟืองทั้งคู่สัมผัสกันตลอดเวลาซึ่งเรียกว่า " จุดพิช " (Pitch point) ลักษณะการขบกันของเฟืองเป็นดังรูปที่ 3.2 การระบุขนาดของเฟืองโดยทั่วไปสามารถทำได้ 3 แบบคือ 1) ใช้ค่าโมดูล (Module : m) ซึ่งเป็นแบบเมตริก 2) ใช้ค่า Diametral pitch : P และ 3) ใช้ค่า Circular pitch : p โดยแต่ละค่ามีความหมายและความสัมพันธ์กันดังนี้

$$m = d/N \quad (3.1)$$

$$P = N/d \quad (3.2)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$p = \pi d/N = \pi m = \pi/P \quad (3.3)$$



รูปที่ 3.2 ลักษณะการขบกันขอฟันเฟืองตรง

และเนื่องจากในสมการ (3.1) นั้น  $d$  มีหน่วยเป็นนิ้ว ดังนั้นเมื่อทำเป็นหน่วยมิลลิเมตรจะได้ว่า

$$m = 25.4/P \quad (3.4)$$

การระบุขนาดของเฟืองอาจใช้ค่าโมดูลมาตรฐานซึ่งสามารถเทียบเคียงได้กับค่า Diametral pitch

### 3.1.1 คุณสมบัติของเฟืองตรง

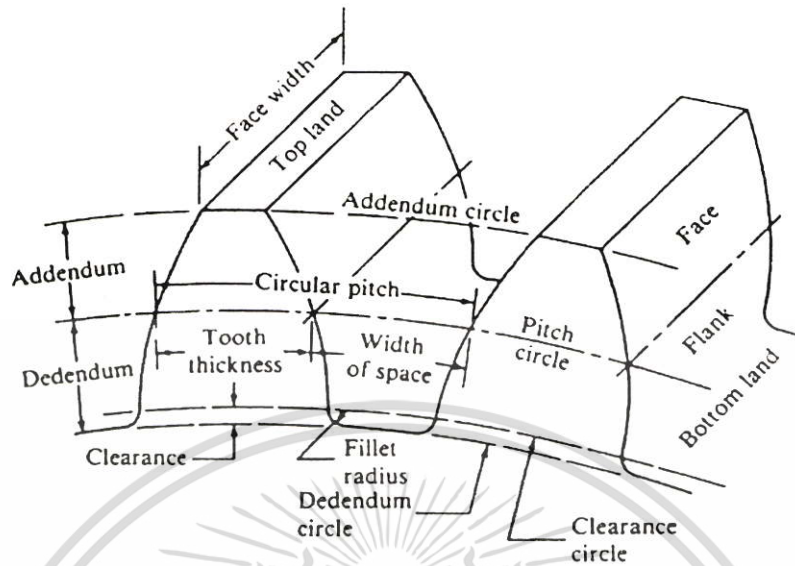
- คุณสมบัติของเฟืองที่มักพบได้บ่อยในการเลือกใช้งานเฟืองเป็นดังรูปที่ 3.3 ได้แก่
- Addendum (a) : คือระยะตามแนวรัศมีของเฟืองจากเส้นผ่านศูนย์กลางพิชถึงยอดฟัน
  - Dedendum (b) : คือระยะตามแนวรัศมีของเฟืองจากเส้นผ่านศูนย์กลางพิชถึงโคนฟัน
  - Clearance (c) : คือระยะตามแนวรัศมีของเฟืองจากยอดฟันถึงโคนฟันของเฟืองคู่ที่ขบกัน

$$c = b - a \quad (3.5)$$

Outside diameter ( $D_o$ ) : เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกของยอดฟันโดยที่

$$D_o = d + 2a = (N + 2)/P = m(N + 2) \quad (3.6)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.3 คุณสมบัติของเฟืองตรง

Root diameter ( $D_r$ ) : คือเส้นผ่านศูนย์กลางของโคนฟันโดยที่

$$D_r = d - 2b \quad (3.7)$$

Whole depth ( $h_f$ ) : คือระยะตามแนวรัศมีของเฟืองจากยอดฟันถึงโคนฟัน

$$h_f = a + b \quad (3.8)$$

Working depth ( $h_k$ ) : คือระยะตามแนวรัศมีซึ่งฟันเฟืองคู่หนึ่งขบกัน

$$h_k = 2a \text{ และ } h_k = h_f - c \quad (3.9)$$

Tooth thickness ( $t$ ) : คือความยาวของส่วนโค้งจากด้านหนึ่งถึงอีกด้านหนึ่งของฟันเมื่อวัดที่เส้นผ่านศูนย์กลางพิช

$$t = p/2 = \pi m/2 \quad (3.10)$$

- Tooth space : คือความยาวส่วนโค้งจากด้านหนึ่งถึงอีกด้านหนึ่งของฟันเมื่อวัดที่เส้นผ่านศูนย์กลางพิช ดังนั้นในทางทฤษฎีแล้ว Tooth space เท่ากับ Tooth thickness
- Backlash (B) : คือระยะช่องว่างระหว่าง Tooth space กับ Tooth thickness
- Face width (F) : คือความกว้างของฟันเมื่อวัดในแนวขนานกับแกนเฟือง
- Face : คือผิวของฟันตั้งแต่บริเวณเส้นผ่านศูนย์กลางพิชจนถึงยอดฟัน
- Flank : คือผิวของฟันตั้งแต่บริเวณเส้นผ่านศูนย์กลางพิชจนถึงโคนฟัน
- Center distance (C) : ระยะห่างระหว่างจุดศูนย์กลางของเฟืองที่ซบกัน

$$C = (D_G + D_p)/2 = (N_G + N_p)/2P \quad (3.11)$$

- Pressure angle ( $\phi$ ) : คือมุมระหว่างเส้นสัมผัสเส้นผ่านศูนย์กลางพิชกับเส้นที่ลากตั้งฉากผิวเฟือง ซึ่งบางครั้งเรียกเส้นตั้งฉากนี้ว่า "line of action"
- Base circle ( $D_b$ ) : คือวงกลมที่สัมผัสกับเส้น line of action

$$D_b = D_o \cos \phi \quad (3.12)$$

- Contact ratio ( $m_c$ ) : คือจำนวนฟันโดยเฉลี่ยที่สัมผัสกันขณะที่เฟืองคู่หนึ่งซบกัน โดยสามารถหาค่าได้จากสมการ

$$m_c = ([R_p^2 - R_{BP}^2]^{1/2} + [R_G^2 - R_{BG}^2]^{1/2} - C \sin \phi) / p \cos \phi \quad (3.13)$$

คุณสมบัติต่างๆของเฟืองตรงอาจหาค่าได้โดยตรงจากตารางที่ 3.1 ตามมาตรฐานของ AGMA (American Gear Manufacturers Association) [16]

### 3.1.2 การคำนวณเกี่ยวกับเฟืองตรง

ลักษณะการรับแรงของเฟืองตรงเป็นดังรูปที่ 3.4 [6]

ความเร็วเชิงเส้นที่เส้นพิช ( $v_t$ ) :  $v_t = \omega R = \pi d n / 60$  (3.14)

ตารางที่ 3.1 คุณสมบัติของเฟืองตรง

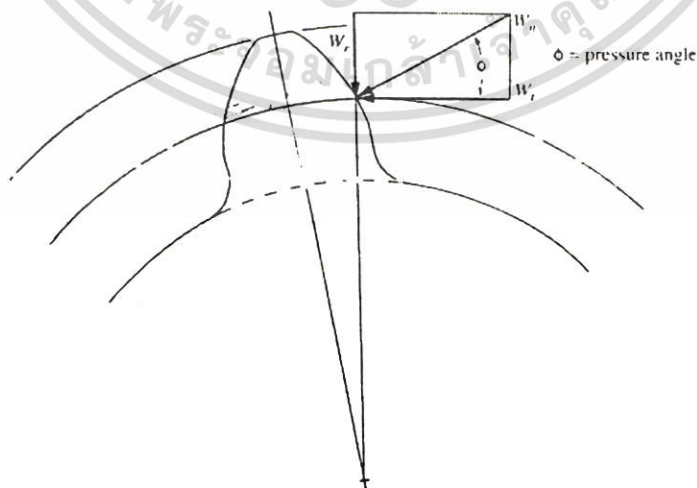
Tooth proportions	Coarse Pitch (1 - 19.99 P)	Fine Pitch (20 - 200 P)
		AGMA 201.02 August 1974 20° or 25° Full Depth
Addendum (a)	1.000 / P	1.000 / P
Dedendum (b)	1.250 / P	1.2000 / P + 0.002(min)
Clearance (c)	0.250 / P	0.200 / P + 0.002(min)
Working depth ( $h_k$ )	2.000 / P	2.000 / P
Whole depth ( $h_f$ )	2.250 / P	2.200 / P + 0.002(min)
Fillet radius of basic rack ( $r_f$ )	0.300 / P	-
Tooth thickness (t)	1.5708 / P	1.5708 / P

อัตราส่วนความเร็ว (Velocity ratio : VR) :

$$VR = \omega_p / \omega_g = n_p / n_g = D_g / D_p = N_g / N_p \quad (3.15)$$

อัตราส่วนเฟือง (Gear ratio :  $m_G$ )  $m_G = N_g / N_p \geq 1.0$

$$(3.16)$$



รูปที่ 3.4 ลักษณะการรับแรงของเฟืองตรง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\text{แรงตามแนวรัศมี (Radial force) } W_r = W_t \tan \phi \quad (3.17)$$

$$\text{แรงตามแนวตั้งฉาก (Normal force) } W_n = W_t / \cos \phi \quad (3.18)$$

$$\text{กำลัง (Power) } P = T \omega = W_t R \omega = W_t v_t \quad (3.19)$$

### 3.1.3 โมเดลการสึกหรอของเฟืองตรง

American Society of Testing and Materials (ASTM) ได้ให้นิยามคำว่า "Wear" หรือ การสึกหรอคือการสูญเสียเนื้อวัสดุที่ผิว (Loss of surface material) จากคำนิยามนี้จะเห็นได้ว่า กระบวนการที่ทำให้เกิดการสูญเสียเนื้อวัสดุที่ผิวนั้นเกิดขึ้นได้จากหลายกระบวนการซึ่งแต่ละ กระบวนการก็มีองค์ประกอบและปัจจัยที่เกี่ยวข้องจำนวนมาก เช่นกระบวนการทางเคมี กระบวนการหลอมเหลว และกระบวนการทางกล ปัจจัยที่มีผลกระทบต่อ การสึกหรอสามารถแบ่ง ออกได้ 3 กลุ่ม คือ 1) ปัจจัยด้านการใช้งาน (Operation parameter) อันได้แก่ ลักษณะทาง กายภาพของพื้นผิว ลักษณะการสัมผัส แรงกระทำ ความเร็วในการถูหรือกลิ้ง สัมประสิทธิ์ความ เสียดทาน เป็นต้น 2) ปัจจัยด้านวัสดุ อันได้แก่ ความแข็ง ความเหนียว Fracture toughness ความต้านทานแรงดึง ความสามารถในการชุบแข็ง มอดูลัสของความยืดหยุ่น โครงสร้าง ชนิดและ ความหนาของสารหล่อลื่น คุณสมบัติด้านความร้อน เป็นต้น และ 3) ปัจจัยแวดล้อม อันได้แก่ ชนิด และปริมาณสารหล่อลื่น ชนิดและปริมาณเศษสิ่งสกปรก (Dirt and Debris) ความแข็งเกร็งของ โครงสร้างที่รองรับ อุณหภูมิ ความต่อเนื่องของการสัมผัส ระยะพิทช์ผิวหรือความตรงศูนย์ ความ เหมาะสมของคู่วัสดุที่สัมผัสกัน เป็นต้น [7] Archard ได้แบ่งประเภทการสึกหรอของโลหะใน สภาวะไม่มีการหล่อลื่นออกเป็น 2 ประเภทคือ 1) การสึกหรอแบบไม่รุนแรง (Mild wear) เมื่อ ผิวสัมผัสขัดสีกันและมีอัตราการสึกหรอต่ำ 2) การสึกหรอแบบรุนแรง (Severe wear) เมื่อ ผิวสัมผัสเกิดความเสียหายและอัตราการสึกหรอเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว [8] ในขั้นตอนการออกแบบ ทางวิศวกรรมเกี่ยวกับการสึกหรอมักนิยมใช้สมการการสึกหรอของ Archard ในการคำนวณ ปริมาตรของผิววัสดุที่หายไปเนื่องจากการสึกหรอของผิวที่มีความแข็ง  $H_v$  ภายใต้แรงกระทำ  $F$  และ ระยะทางการเคลื่อนที่  $S$

$$V = K F S / (3H_v) \quad (3.20)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่  $K$  คือค่าคงที่ สมการดังกล่าวมีข้อดีคือใช้งานง่ายแต่อย่างไรก็ตามก็ยังไม่สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในทางปฏิบัติได้ เนื่องจากค่า  $K$  นั้นขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย [12] ด้วยเหตุนี้จึงยังไม่มีสมการการสึกหรอทั่วไปที่มาจากวิธีการเชิงวิเคราะห์ สมการการสึกหรอโดยส่วนใหญ่มักเป็นสมการที่ได้จากการทดลอง (Empirical equation) และใช้ได้เป็นเฉพาะกรณีเท่านั้น รูปสมการการสึกหรอที่ได้จากการทดลองโดยส่วนใหญ่มักอยู่ในรูปสมการยกกำลังซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการสึกหรอกับตัวแปรอิสระ [7]

$$\gamma = K A^a B^b C^c D^d \dots \quad (3.21)$$

$$E^e F^f G^g H^h \dots$$

ในการออกแบบเฟืองตรงนอกจากต้องคำนึงถึงความปลอดภัยจากความเสียหายเนื่องจากการดัดโค้ง (Bending) ที่โคนฟัน ความเสียหายแบบหลุม (Pitting) ที่ผิวซึ่งเกิดขึ้นเนื่องจากความเค้นกดที่กระทำซ้ำๆ ที่ผิวเฟืองตลอดเวลาแล้วยังต้องคำนึงถึงความเสียหายเนื่องจากการสึกหรอของฟันซึ่งส่งผลต่อประสิทธิภาพการส่งถ่ายกำลังของเฟือง การสึกหรอของฟันอาจเกิดขึ้นได้ 3 ลักษณะคือ 1) การสึกหรอแบบปกติ (Normal wear) หรือการสึกหรอแบบขัดถู (Polishing) เป็นการสึกหรอที่ผิวสัมผัสแบบซ้ำๆ ซึ่งไม่ส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพการทำงานของเฟืองตลอดอายุการใช้งาน 2) การสึกหรอปานกลาง (Moderate wear) เป็นการสึกหรออย่างรวดเร็วจนทำให้ฟันเฟืองรับแรงมากขึ้น การสึกหรอลักษณะนี้อาจไม่ทำให้เฟืองเสียหายในทันทีแต่อายุการใช้งานจะสั้นลงและเกิดเสียงดังขณะใช้งาน และ 3) การสึกหรอแบบทำลาย (Destructive wear) เป็นการสึกหรอที่ทำให้ฟันเฟืองเกิดการเปลี่ยนรูปร่างและส่งผลต่อความสม่ำเสมอในการส่งถ่ายกำลังของเฟือง [8] ลักษณะการสัมผัสกันระหว่างผิวเฟืองคู่หนึ่งๆนั้นถือได้ว่าเป็นผิวโค้ง 2 อันที่สัมผัสกัน หากพิจารณาให้เฟืองเป็นวัสดุที่มีความแข็งเกร็ง (Rigid) ดังนั้นการสัมผัสกันของผิวเฟืองจะมีลักษณะเป็นเส้น (Line contact) แต่ในความเป็นจริงแล้วเฟืองมีคุณสมบัติยืดหยุ่น ดังนั้นขณะสัมผัสกันฟันเฟืองย่อมต้องมีการเปลี่ยนรูป (Deformation) รอยสัมผัสจึงมีลักษณะเป็นพื้นที่รูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า [6] ซึ่งมีความยาวเท่ากับความกว้างของฟัน ความเค้นที่เกิดขึ้นจากการสัมผัสลักษณะนี้เรียกว่า "ความเค้นผิวสัมผัส" (Contact stress) และสามารถหาได้จาก Hertzian stress [9]

$$\sigma_c^2 = \frac{(W_1)}{\pi F \cos \phi} \frac{1}{\left\{ \frac{1 - \nu_1^2}{E_1} + \frac{1 - \nu_2^2}{E_2} \right\}} \left( \frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} \right) \quad (3.22)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการศึกษานี้กำหนดให้มีตัวแปรอิสระคือ  $N^*$  และ  $\alpha$  โดยที่  $N^*$  เป็นตัวแปรไร้มิติซึ่งกำหนดให้เป็นอัตราส่วนของจำนวนรอบ (life cycle) ต่อ 1 ล้านรอบ นั่นคือ

$$N^* = N/N_L \quad \text{โดยที่} \quad N_L = 1 \text{ ล้านรอบ} \quad (3.23)$$

และ  $\alpha$  เป็นตัวแปรไร้มิติซึ่งเป็นฟังก์ชันของอัตราส่วนความเค้นและอัตราส่วนความเร็วรอบของเฟือง

$$\alpha = (\sigma_c/S_{ut})(n/n_0)^{1/2} \quad \text{โดยที่} \quad n_0 = 1,000 \text{ รอบต่อนาที}$$

$D$  เป็นตัวแปรตามไร้มิติซึ่งเป็นเปอร์เซ็นต์ความลึกของการสึกหรอ ( $w$ ) ต่อของความหนาของฟันที่จุดพิช ( $t$ )

$$D = (w/t)100\% \quad (3.24)$$

จากสมการที่ (3.10)  $t = \pi/2P$  เมื่อแทนค่าคงที่ และ  $m = 1.25$  ลงในสมการ (3.24) จะได้ว่า

$$D = 50.96 w \quad (3.25)$$

### 3.2 การผลิตและการใช้งานเฟือง

การผลิตเฟืองโลหะเริ่มจากการทำลำตัวของเฟืองที่เรียกว่า Gear blank อาจทำมาจากแผ่นเหล็กรีด ท่อนเหล็ก การทุบขึ้นรูป หล่อทราย หรือหล่อแม่พิมพ์ ในขั้นนี้อาจทำการคว้านรูและร่องลิ้นจนได้ขนาดหรือใกล้เคียงขนาดที่ต้องการ จากนั้นจึงนำลำตัวเฟืองนี้ไปทำฟันเฟือง เฟืองที่ไม่ต้องการความละเอียดมากนักอาจใช้กรรมวิธีการผลิตโดยการหล่อแม่พิมพ์จนได้เฟืองสำเร็จรูป หากเป็นเฟืองขนาดใหญ่มากอาจใช้วิธีการประกอบ (Component) เช่นการเชื่อมหรือการยึดฟันเฟืองเข้ากับลำตัวเฟือง กรรมวิธีการผลิตฟันเฟืองที่มักใช้กันคือ 1) Form milling 2) Shaping และ 3) Hobbing ในการทำ Form milling นั้นจะใช้มีดกัด (Cutter) ที่มีรูปร่างเหมือน Tooth space กัดแต่ละ Tooth space ของเฟือง เป็นวิธีที่ใช้ในการผลิตเฟืองขนาดใหญ่ ในการทำ Shaping นั้นจะใช้มีดกัด Gear blank กลับไปมาจนได้ฟันเฟืองที่มีรูปร่างแบบอินวอลูตอย่างช้าๆ เป็นวิธีที่ใช้ในการผลิตเฟืองใน ส่วนการทำ Hobbing นั้นคล้ายคลึงกับการทำ Form milling แต่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

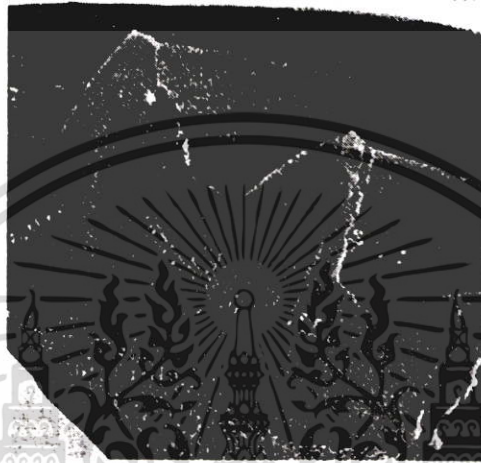
แตกต่างกันตรงที่ Cutter และ Gear blank นั้นจะหมุนไปด้วยกัน ดังนั้นฟันจะถูกกัดอย่างช้าๆ ขณะที่เม็ดกัดถูกป้อนเข้าไปยัง Gear blank เมื่อเฟืองผ่านกระบวนการกัดจนได้ฟันที่สมบูรณ์แล้วก็จะนำไปทำการเก็บผิว เช่นการเจียรนัย (Grinding) ซึ่งจำให้ได้เฟืองที่มีรูปร่างถูกต้องและมีความละเอียดสูง [6] สำหรับเฟืองที่ทำจากวัสดุโพลีเมอร์เช่นพลาสติกวิศวกรรม (Engineering plastic) นั้นบางชนิดสามารถผลิตได้โดยกรรมวิธีเช่นเดียวกับเฟืองโลหะ แต่โดยส่วนใหญ่แล้วมักผลิตด้วยกระบวนการฉีดในแม่พิมพ์ (Injection molding) เพราะสามารถผลิตได้ในปริมาณมากใช้เวลาน้อยและมีต้นทุนต่อหน่วยต่ำ ในการพิจารณาเลือกใช้เฟืองเพื่อการใช้งานอย่างเหมาะสมนั้นอาจพิจารณาได้จากประเภทของเฟือง ซึ่งเฟืองสามารถแบ่งได้ 2 กลุ่มใหญ่ๆโดยจำแนกตามระนาบของแกนเฟือง คือ 1) เฟืองแบบ Co-planar 2) เฟืองแบบ Non-planar เฟืองแบบ Co-planar คือเฟืองที่แกนอยู่บนระนาบเดียวกันซึ่งอาจขนานกัน (Parallel) หรือ ตัดกัน (Intersect) ก็ได้ ตัวอย่างของเฟืองที่แกนเฟืองขนานกันได้แก่ เฟืองตรง (Spur gear) และ เฟืองเฉียง (Helical gear) ส่วนตัวอย่างเฟืองที่แกนเฟืองตัดกันได้แก่ เฟืองดอกจอก (Bevel gear) เป็นต้น เฟืองแบบ Non-planar คือเฟืองที่แกนเฟืองไม่ขนานและไม่ตัดกัน เช่น เฟืองตัวหนอน Spiroid gear และ Hypoid gear เป็นต้น คุณสมบัติที่สำคัญของเฟืองแบบ Co-planar คือลักษณะการเคลื่อนที่จะเป็นแบบกลิ้ง (Pure rolling) ที่บริเวณเส้นพิช (Pitch line) และมักเป็นแบบกลิ้งที่บริเวณยอดฟัน (Tooth tip) ส่วนเฟืองแบบ Non-planar นั้นลักษณะการเคลื่อนที่จะเป็นแบบถู (Sliding) ที่บริเวณเส้นพิช เช่นเฟืองตัวหนอนมีลักษณะการเคลื่อนที่ส่วนใหญ่แบบถูและมีการเคลื่อนที่แบบกลิ้งน้อยมาก [8]

### 3.3 ความเสียหายของเฟือง

โดยทั่วไปแล้วความเสียหายที่เกิดกับเฟืองมักเกิดขึ้นที่บริเวณ 2 บริเวณ คือ 1) บริเวณโคนฟัน และ 2) บริเวณ Flank ความเสียหายที่เกิดบริเวณโคนฟันมักเป็นความเสียหายที่ไม่สามารถใช้งานเฟืองต่อไปได้อีก ได้แก่ 1.1) การแตกเนื่องจากการรับโหลดเกิน (Overload breakage) ซึ่งผิวแตก (Fractured surface) จะมีลักษณะแตกต่างกันไปตามชนิดของวัสดุ กล่าวคือถ้าเป็นการแตกแบบเปราะ (Brittle fracture) ผิวแตกจะมีลักษณะค่อนข้างราบและหยาบ แต่หากเป็นการแตกแบบเหนียว (Ductile fracture) ผิวแตกจะมีลักษณะตะปุ่มตะป่ำเป็นซี่ๆ สาเหตุของการแตกแบบรับโหลดเกินคือความเค้นที่โคนฟันเกินค่าความแข็งแรงของวัสดุ ซึ่งอาจเกิดได้เมื่อมีแรงบิดกระทำอย่างฉับพลันตอนเริ่มหมุนหรือหยุดหมุน หรือมีสิ่งแปลกปลอมเข้าไปแทรกอยู่ระหว่างฟันเป็นต้น การป้องกันความเสียหายลักษณะนี้ได้แก่การใช้ Safety clutch หรือ ตัวจำกัดแรงบิด เป็นต้น 1.2) การแตกเนื่องจากความล้า (Fatigue breakage) ดังรูปที่ 3.5 ผิวแตกจะมีลักษณะเนียนละเอียดและมักจะพบเห็น "เส้นเนินทราย" (Beach mark) รอบๆจุดเริ่มต้นของการแตกและอาจมีคราบสี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

น้ำตาลเนื่องจากการสึกกร่อน (Corrosion) ร่วมอยู่ด้วยก็ได้ สาเหตุสำคัญของความเสียหายลักษณะนี้คือ วัสดุที่ใช้ไม่เหมาะสม ขนาดฟันเฟืองไม่เหมาะสมกับการรับแรง ความไม่สม่ำเสมอของการสัมผัสระหว่างเฟืองที่ขบกัน เช่นการการสัมผัสไม่เต็มหน้าฟัน หรืออาจเกิดจากการขูดผิวแข็งที่ไม่ได้คุณภาพ โดยทั่วไปแล้วพบว่าถ้าหากเฟืองสามารถใช้งานได้ถึง  $10^7$  ครั้งของการหมุน ความเสียหายแบบนี้มักจะไม่มีเกิดขึ้น ส่วนความเสียหายที่เกิดบริเวณ Flank นั้นมักทำให้เกิดเสียงดัง การหมุนไม่ราบเรียบเกิดความร้อนสูง และนำไปสู่ความเสียหายของเฟืองทั้งอันในที่สุด



รูปที่ 3.5 ความเสียหายเนื่องจากความล้าของเฟืองตรง

ความเสียหายที่เกิดบริเวณ Flank ได้แก่ 2.1) การเกิดหลุม (Pitting) เป็นการหลุดร่อนของวัสดุที่ผิวบริเวณ Flank โดยมีลักษณะเป็นรูๆตรงบริเวณใกล้กับเส้นพิซดังรูปที่ 3.6 แต่ในบางครั้งพบว่าการสึกหรอของเฟืองที่มีความสม่ำเสมอบริเวณ Flank ก็อาจทำให้ Pitting ที่เกิดขึ้นในระยะเริ่มต้นหายไปได้เช่นกัน Pitting ทำให้ความหนาของเฟืองลดลงและอาจนำไปสู่ความเสียหายแบบความล้าได้ สาเหตุสำคัญของความเสียหายลักษณะนี้คือ ความเค้นกดที่ผิวฟันสูงกว่า Hertzian stress



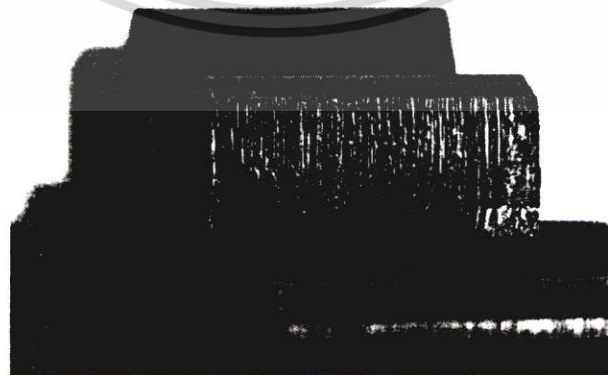
รูปที่ 3.6 ความเสียหายแบบ pitting ที่บริเวณ Flank ของเฟืองตรง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตามสมการที่ (3.22) ซึ่งมักเกิดกับเฟืองที่ไม่ได้ผ่านการชุบผิวแข็ง ความไม่สม่ำเสมอของแรงบิด ความไม่สม่ำเสมอของการสัมผัส ก็มีส่วนทำให้เกิดความเสียหายแบบนี้ได้เช่นกัน โดยทั่วไปแล้วพบว่าถ้าหากเฟืองสามารถใช้งานได้ถึง  $3 \times 10^8$  ครั้งของการหมุนความเสียหายแบบนี้มักจะไม่มีเกิดขึ้น การเกิด Pitting อาจสังเกตได้จากอาการเบื้องต้นคือการสั่นสะเทือนของเฟืองขณะใช้งาน การป้องกันความเสียหายลักษณะนี้ได้แก่การระมัดระวังในการ Machining การเลือกใช้วัสดุที่เหมาะสม การตรวจสอบลักษณะการสัมผัสของคู่เฟืองก่อนการนำไปใช้งาน การใช้สารหล่อลื่นที่มีสาร  $MoS_2$  เป็นต้น 2.2) การเกิด (Spalling) ดังรูปที่ 3.7 เป็นความเสียหายที่มักเกิดกับเฟืองที่ผ่านการชุบผิวแข็งแบบ Case hardening และ Induction hardening โดยจะเกิดการหลุดเป็นสะเก็ดที่บริเวณ Flank สาเหตุของความเสียหายแบบนี้มักมาจากความบกพร่องของเนื้อวัสดุ (Material defect) ความบกพร่องของการ Machining การชุบผิวแข็งที่ไม่ได้คุณภาพ หรืออาจเกิดจากแรงเสียดทานสูงเนื่องจากใช้สารหล่อลื่นที่มีความหนืดต่ำก็ได้ โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อใช้งานที่อุณหภูมิสูงกว่า  $100^\circ C$  การป้องกันความเสียหายลักษณะนี้เช่นเดียวกับการป้องกันการเกิด



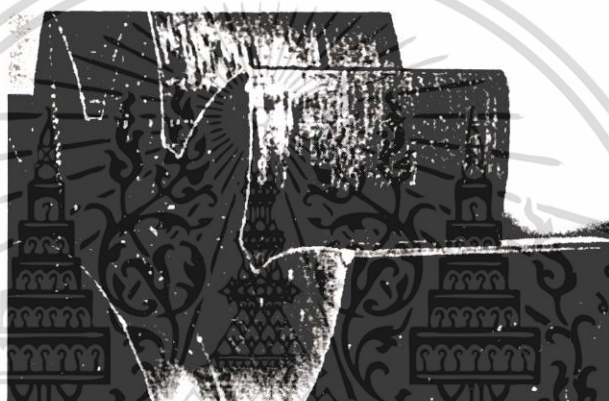
รูปที่ 3.7 ความเสียหายแบบ spalling ที่บริเวณ Flank ของเฟืองตรง



รูปที่ 3.8 ความเสียหายจากการสึกหรอของเฟืองตรง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาหรือข้อมูลอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Pitting 2.3) การสึกหรอ ดังรูปที่ 3.8 เพื่อมีการสึกหรอในสภาพปกติระหว่างการใช้งานโดยสังเกตได้จากร่องรอยการ Machining จะหายไป แต่การสึกหรอแบบทำลายก็อาจเกิดขึ้นได้หากขนาดสารหล่อลื่นหรือชนิดสารหล่อลื่นไม่เหมาะสม หรือความเร็วเชิงเส้นของการหมุนต่ำ เช่นต่ำกว่า 0.5 เมตรต่ออนาที 2.4) การเกิด Scuffing หรือ "Seizing" , "Scoring" , "Galling" ดังรูปที่ 3.9 ซึ่งจะเกิดรอยยุบเป็นเส้นขึ้นก่อนแล้วติดตามด้วยการเกิดรอยคล้ายรอยข่วนโดยมีความลึกอยู่ในระหว่าง 3 ถึง 5 ไมครอน มักจะเกิดในบริเวณที่มีการเคลื่อนที่แบบถูมากที่สุดได้แก่ยอดฟันและโคนฟัน 2.5) การเกิด Plastic flow หรือ Plastic deformation ซึ่งจะเกิดขึ้นเนื่องจากมีสิ่งแปลกปลอมเข้าไปแทรกอยู่ระหว่างฟัน ทำให้เกิดการเสียรูปที่อาจมีลักษณะแบนราบหรือเป็นคลื่นๆที่ Face ของเฟือง 2.6) การเกิด Surface crack หรือ การเกิดรอยแตกเนื่องจากการ



รูปที่ 3.9 ความเสียหายแบบ scuffing ของเฟืองตรง

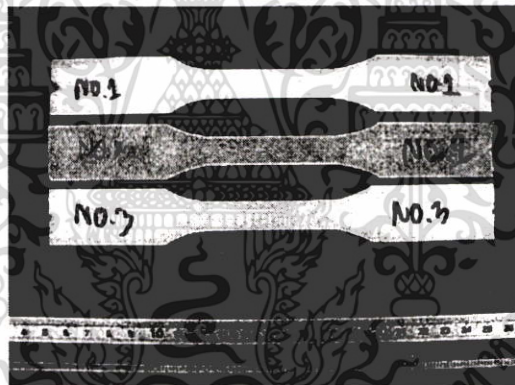
อบชุบทางความร้อน (Quenching crack) จะเกิดรอยแตกเป็นแนวยาวบนผิวเนื่องจากความบกพร่องของความแข็ง มักจะเกิดกับวัสดุที่เป็นเหล็กกล้าคาร์บอนสูง เหล็กชุบผิวแข็งที่มีปริมาณอัลลอยด์สูง [10]

## บทที่ 4

### การทดลอง

#### 4.1 การทดสอบแรงดึง (Tensile test)

โดยทั่วไปแล้วคุณสมบัติทางกลของวัสดุสามารถหาได้จากการทดสอบแรงดึงในการศึกษา นี้ได้ทำการทดสอบแรงดึงวัสดุทั้ง 3 ชนิด โดยที่กระบวนการทดสอบแรงดึง โพลีเอไมด์ และโพลี อีทิลีนเททราฟลูออไรด์เป็นไปตามมาตรฐาน ASTM D638-03 ซึ่งต้องทำการเตรียมชิ้นทดสอบให้ได้รูปร่าง และขนาดตามมาตรฐานกำหนด เนื่องจากโพลีเอไมด์ และโพลีอีทิลีนเททราฟลูออไรด์เป็นพลาสติกที่มีค่า โมดูลัสของความยืดหยุ่น (Young modulus) สูงกว่า 1,700 เมกะพาสคาลจึงถูกจัดเป็นกลุ่ม พลาสติกแข็ง (Rigid plastic) ตามมาตรฐาน ASTM D883-00 [11] ดังนั้นจึงต้องเตรียมชิ้นงาน ทดสอบเป็นชิ้นงานแบนดังรูปที่ 4.1 ส่วนเหล็กหล่อเบอร์ 30 นั้นสามารถเตรียมชิ้นทดสอบเป็น ชิ้นงานกลมขนาดตามมาตรฐานได้ดังรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.1 ชิ้นงานทดสอบความต้านทานแรงดึงโพลีเอไมด์ และโพลีอีทิลีนเททราฟลูออไรด์



รูปที่ 4.2 ชิ้นงานทดสอบความต้านทานแรงดึงเหล็กหล่อเบอร์ 30

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ก่อนการทดสอบแรงดึงได้ทำการอบชิ้นงานในห้องทดสอบที่อุณหภูมิ  $23 \pm 2^{\circ}\text{C}$  ความชื้นสัมพัทธ์  $50 \pm 5\%$  เป็นระยะเวลา 40 ชั่วโมงแล้วทำการทดสอบแรงดึงโดยใช้ความเร็วในการดึง  $50 \pm 10\%$  มิลลิเมตรต่อนาที และใช้ Extensometer บันทึกค่าความเครียดเพื่อใช้ในการคำนวณค่าโมดูลัสของความยืดหยุ่นดังรูปที่ 4.3 และ 4.4 ส่วนกระบวนการทดสอบแรงดึงเหล็กหล่อเป็นไปตามมาตรฐาน ASTM A370



รูปที่ 4.3 การทดสอบความต้านทานแรงดึงของโพลีเอทิลีน



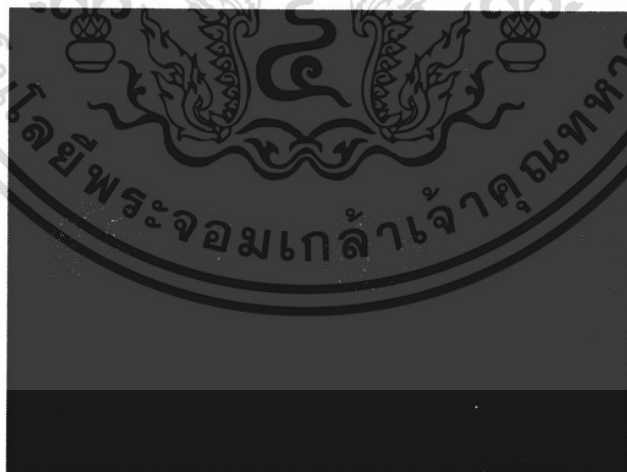
รูปที่ 4.4 การทดสอบความต้านทานแรงดึงเหล็กหล่อเบอร์ 30

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการทดสอบแรงดึงจำทำให้ได้ข้อมูลที่สำคัญคือ ค่าความแข็งแรงต่อแรงดึง (Tensile strength) และค่าค่าโมดูลัสของความยืดหยุ่น ซึ่งจะนำไปใช้เป็นตัวกำหนดแรงบิดในการทดสอบการสึกหรอของเฟืองต่อไป

## 4.2 การทดสอบความแข็งแรงแบบรีอคเวลและบริเนล

วัสดุที่ได้จากกระบวนการผลิตอาจมีความไม่สม่ำเสมอของเนื้อวัสดุ (Non-homogenous) ทำให้คุณสมบัติทางกลไม่เท่ากันตลอดทั้งชิ้น หรือมีค่าแตกต่างกันในแต่ละแนวของชิ้นวัสดุ การทดสอบความแข็งแรงแบบรีอคเวลทำให้ทราบแนวโน้มว่าชิ้นวัสดุนั้นๆ มีคุณสมบัติทางกลสม่ำเสมอหรือไม่ ในการศึกษานี้ทำการทดสอบความแข็งแรงแบบรีอคเวลวัสดุโพลีเอไมด์ และโพลีเอทิลีนเมทิลีน เพื่อดูความสม่ำเสมอของเนื้อวัสดุ ตามมาตรฐาน ASTM D785-03 โดยเตรียมชิ้นทดสอบความหนา 25 มิลลิเมตร ดังรูปที่ 4.5 ทำการอบชิ้นงานในห้องทดสอบที่อุณหภูมิ  $23 \pm 2^{\circ}\text{C}$  ความชื้นสัมพัทธ์  $50 \pm 5\%$  เป็นระยะเวลา 40 ชั่วโมงแล้วทำการทดสอบความแข็งแรงแบบรีอคเวลเสกัล M โดยใช้หัวกดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6.35 มิลลิเมตร แรงกด 10 กิโลกรัม ใช้เวลาในการกดแช่นาน 15 วินาที ส่วนวัสดุเหล็กหล่อเบอร์ 30 นั้นใช้การทดสอบความแข็งแรงแบบบริเนล ตามมาตรฐาน ASTM E10 โดยใช้หัวกดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.5 มิลลิเมตร แรงกด 187.5 นิวตัน ใช้เวลาในการกดแช่นาน 15 วินาทีดังรูปที่ 4.6



รูปที่ 4.5 ชิ้นทดสอบความแข็งแรงแบบรีอคเวล



รูปที่ 4.6 การทดสอบความแข็งแรงแบบปริเนล

#### 4.3 การทดสอบหาอัตราส่วนปัวซอง (Poisson's ratio)

การคำนวณเพื่อหาความเค้นกดที่ผิวของเฟืองขณะขบกันโดยใช้สมการ (3.22) นั้น จำเป็นต้องทราบค่าอัตราส่วนปัวซองของวัสดุเฟืองคู่ที่ขบกัน ในการศึกษาครั้งนี้จึงได้ทำการทดลองหาค่าอัตราส่วนปัวซองของวัสดุทั้ง 3 ชนิดคือ โพลีเอไมด์ โพลีเอทิลีนและเหล็กหล่อเบอร์ 30 โดยใช้เส้นตรงเกจเป็นตัววัดความเครียดบนชิ้นทดสอบ และอ่านค่าความเครียดในแนวแกน (Axial strain) และในแนวขวาง (Transverse strain) ของชิ้นงานทดสอบขณะรับแรงดึงในแนวแกนโดยใช้ชุดอ่านค่าความเครียด (Strain indicator unit) ดังรูปที่ 4.7 กระบวนการในการทดลองหาค่าอัตราส่วนปัวซองของชิ้นทดสอบที่เป็นพลาสติกเป็นไปตามมาตรฐาน ASTM D638-03 โดยให้แรงในการทดสอบที่ทำให้เกิดความเค้นในช่วงยืดหยุ่น (Elastic) ในชิ้นทดสอบ และกระบวนการในการทดลองหาค่าอัตราส่วนปัวซองของเหล็กหล่อเบอร์ 30 เป็นไปตามมาตรฐาน ASTM A370



รูปที่ 4.7 การทดสอบหาค่าอัตราส่วน壁厚ของ

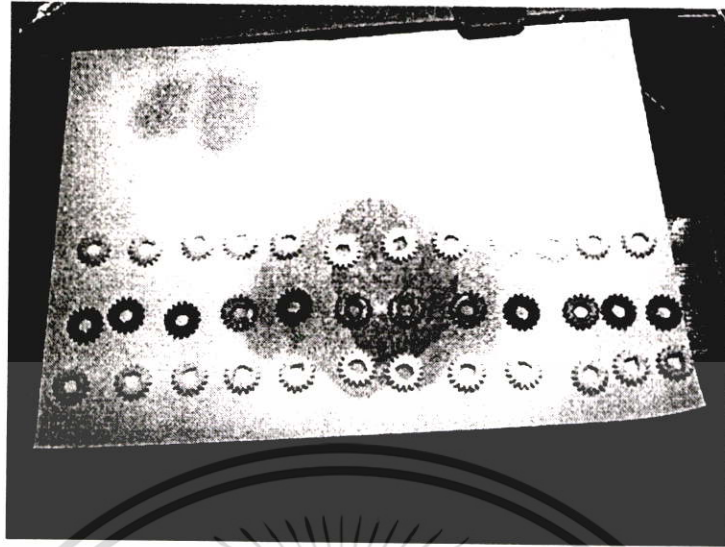
#### 4.4 การเตรียมชิ้นงานเฟืองตรงสำหรับทดสอบการสึกหรอ

การเตรียมชิ้นงานเฟืองตรงในการศึกษานี้ใช้วิธีกัดโดยมีดกัดเฟืองโมดูล 1.25 มุมความดัน 20 องศา จากนั้นนำเฟืองตรงที่กัดแล้วมาทำความสะอาดด้วยเครื่องล้างความถี่สูง (Ultrasonic cleaner bath) ดังรูปที่ 4.8 เพื่อกำจัดเศษวัสดุที่อาจติดอยู่ระหว่างร่องฟันเฟือง แล้วนำเฟืองที่ทำความสะอาดแล้วดังรูปที่ 4.9 มาวัดโปรไฟล์เริ่มต้นก่อนการทดสอบโดยใช้เครื่อง CMM (Coordinate Measuring Machine) ซึ่งมีความละเอียดในการวัด 0.01 ไมครอน ดังรูปที่ 4.10

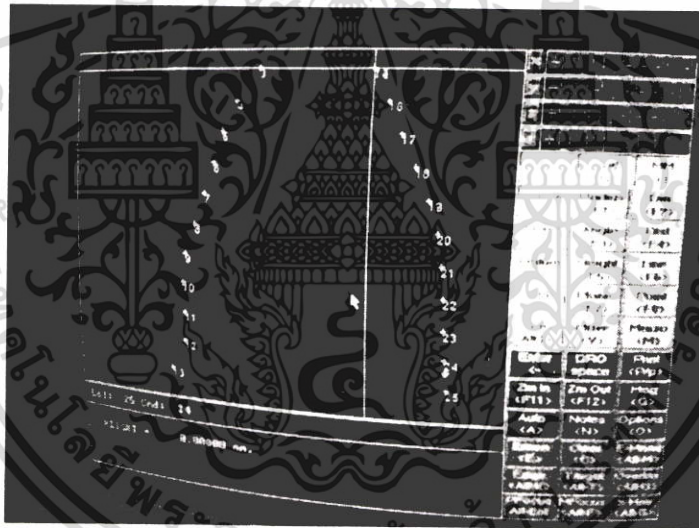


รูปที่ 4.8 การทำความสะอาดเฟืองด้วยเครื่องล้างความถี่สูง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.9 ตัวอย่างเฟืองที่ใช้ในการทดสอบ



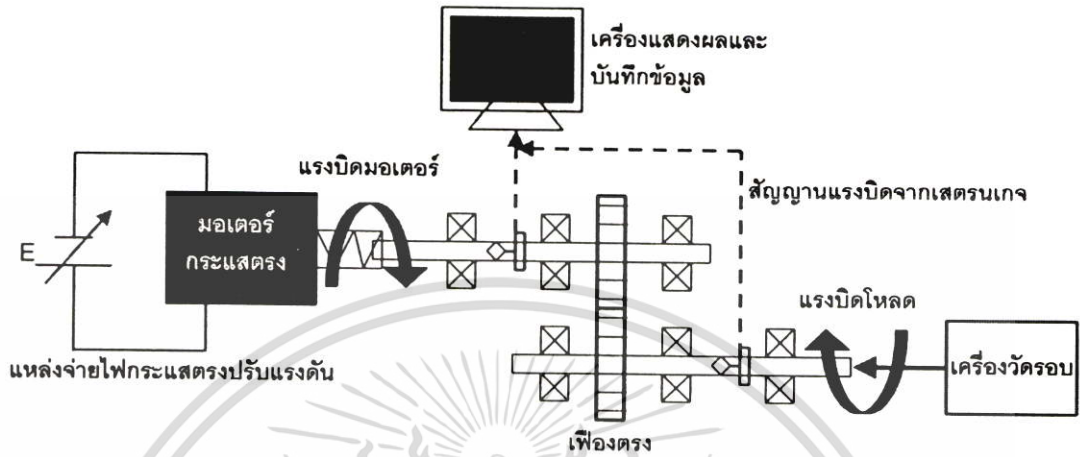
รูปที่ 4.10 การวัดโปรไฟล์เฟืองตรงด้วยเครื่อง CMM

#### 4.5 การทดสอบการสึกหรอของเฟืองตรง

ในการศึกษานี้ทำการทดสอบการสึกหรอของเฟืองตรงโดยการทดสอบเฟืองเป็นคู่ๆบนเครื่องทดสอบการสึกหรอที่ออกแบบและจัดทำขึ้น โดยมีรายละเอียดในภาคผนวก ก ในการทดสอบนี้มีการตรวจวัดและควบคุมค่าแรงบิดของโหลดที่ให้กับชุดเฟืองโดยการปรับแรงตึงของชุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Band brake และทำการตรวจวัดและควบคุมค่าความเร็วยรอบของชุดเฟืองขณะทำการทดสอบ แผนผังการตรวจวัดค่าต่างๆขณะทดสอบการสึกหรอของเฟืองตรงเป็นดังรูปที่ 4.11



รูปที่ 4.11 แผนผังการตรวจวัดค่าต่างๆขณะทดสอบการสึกหรอของเฟืองตรง

เนื่องจากวัสดุทั้ง 3 ชนิดมีค่าความต้านทานแรงดึง ค่ามอดูลัสของความยืดหยุ่น และอัตราส่วนปัวของแตกต่างกัน ดังนั้นในการศึกษานี้จะใช้ " อัตราส่วนความเค้น " (Stress ratio : SR) ซึ่งเป็นอัตราส่วนระหว่างความเค้นสัมผัส (Contact stress :  $\sigma_c$ ) ต่อความต้านทานแรงดึง (Tensile strength :  $S_{ut}$ ) ของวัสดุในการศึกษาการสึกหรอเพื่อให้สามารถเปรียบเทียบผลการสึกหรอระหว่างวัสดุโพลีเมอร์และเหล็กหล่อได้ แรงบิดที่ใช้ในการทดสอบเฟืองแต่ละชนิดสามารถคำนวณได้จากสมการ (3.18) , (3.19) และ (3.22) โดยกำหนดให้ความเค้นสัมผัส  $\sigma_c$  มีค่าเทียบเท่ากับอัตราส่วนความเค้น 0.25 , 0.5 , และ 0.75 เนื่องจากเป็นเฟืองคู่ที่ทำจากวัสดุเดียวกันและมีขนาดเท่ากัน ดังนั้น  $E_1 = E_2$  ,  $V_1 = V_2$  และ  $r_1 = r_2$  จะได้ว่า

$$T = \frac{\pi (1 - \nu^2) d^2 F \sin\phi \cos\phi \sigma_c^2}{4E} \quad (4.1)$$

$$SR = \sigma_c / S_{ut} \quad (4.2)$$

เมื่อใช้ค่า  $m = 1.25$  ,  $N = 17$  ฟัน ,  $\phi = 20^\circ$  ,  $F = 3$  มิลลิเมตร , และ  $SR = 0.25$  ,  $0.5$  และ  $0.75$  จะสามารถหาค่าแรงบิดที่ต้องใช้เพื่อศึกษาผลกระทบของแรงบิดและความเร็วยรอบที่มีต่อการสึกหรอของเฟืองตรงที่ทำจากวัสดุทั้ง 3 ชนิดสรุปได้ดังตารางที่ 4.11

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.1 สภาวะที่ใช้ทดสอบเพื่อศึกษาผลกระทบของแรงบิดและความเร็วรอบต่อการสึกหรอ

วัสดุ	แรงบิด (kg.cm)	ความเร็วรอบ (rpm)	วัสดุ	แรงบิด (kg.cm)	ความเร็วรอบ (rpm)	วัสดุ	แรงบิด (kg.cm)	ความเร็วรอบ (rpm)		
โพลีเอทิลีน	0.26	1,000	โพลีเอไมด์	0.26	1,000	เหล็กหล่อเบอร์30	0.26	1,000		
		1,500			1,500			1,500		
		2,000			2,000			2,000		
	1.04	1,000		1.04	1,000		1.04	1,000	1.04	1,000
		1,500			1,500			1,500		
		2,000			2,000			2,000		
	2.34	1,000		2.34	1,000		2.34	1,000	2.34	1,000
		1,500			1,500			1,500		
		2,000			2,000			2,000		

เมื่อทำการทดสอบครบทุกๆ 500,000 รอบ ทำการถอดเฟืองจากชุดทดสอบแล้วนำไปทำความสะอาดเพื่อกำจัดเศษผงวัสดุที่หลุดร่อนออกจากผิวเฟืองโดยใช้ลมแห้งเป่า จากนั้นทำการตรวจวัดและบันทึกโปรไฟล์และความลึกของรอยสึกหรอที่เกิดขึ้น แล้วนำไปประกอบกับชุดทดสอบและทำการทดสอบต่อไปจนครบ 5 ล้านรอบ การทดสอบการสึกหรอของเฟืองตรงได้แสดงไว้ดังรูปที่ 4.12



รูปที่ 4.12 การทดสอบการสึกหรอของเฟืองตรง

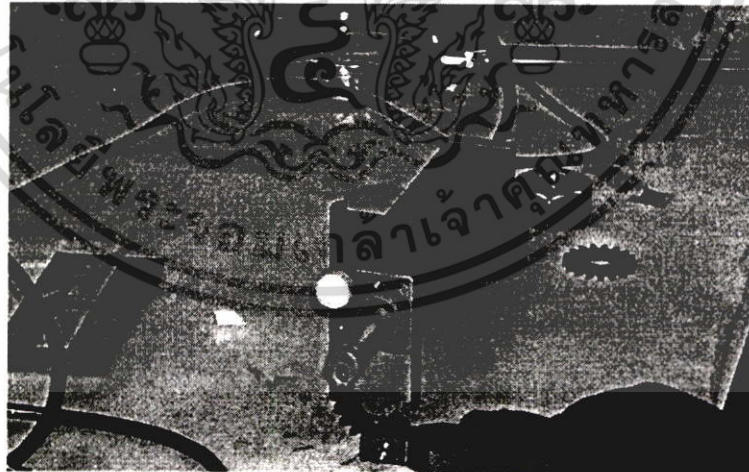
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.6 การวัดความหยาบผิวของเฟืองตรง

ในการศึกษานี้ใช้เฟืองที่ผลิตมาจากการกัดโดยใช้มีดกัดเฟืองซึ่งทำให้ได้ความค่าความหยาบของผิวเฟืองใกล้เคียงกันสำหรับวัสดุชนิดเดียวกันและมีค่าต่างกันเล็กน้อยสำหรับวัสดุต่างชนิดกันจะทำการวัดค่าความหยาบผิวก่อนและหลังการทดสอบครบ 5 ด้านรอบ เนื่องจากเฟืองมีขนาดเล็กมากจึงต้องนำเฟืองมาผ่าและทำความสะอาดด้วยเครื่องล้างความถี่สูง แล้วจึงวัดความหยาบผิวโดยใช้เครื่องยี่ห้อ TOKYO SEIMITSU Handysurf รุ่น E-30A ซึ่งหัววัดเป็น Vertex มีรัศมี 5 ไมครอน โดยทำการสอบเทียบเครื่องวัดความหยาบก่อนการวัดดังรูปที่ 4.13 และ 4.14



รูปที่ 4.13 สอบเทียบเครื่องมือวัดความหยาบด้วยแท่งสอบเทียบ



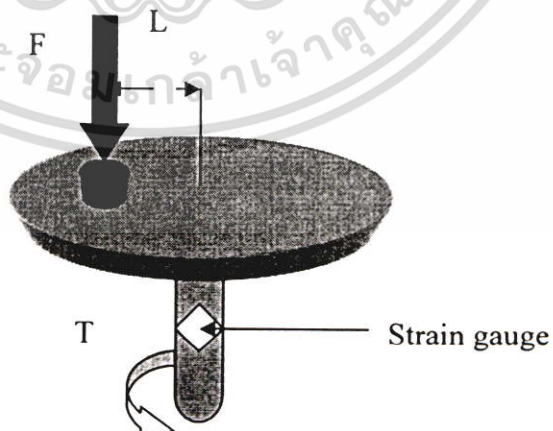
รูปที่ 4.14 การวัดค่าความหยาบผิวของเฟืองตรง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.7 การวัดสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน

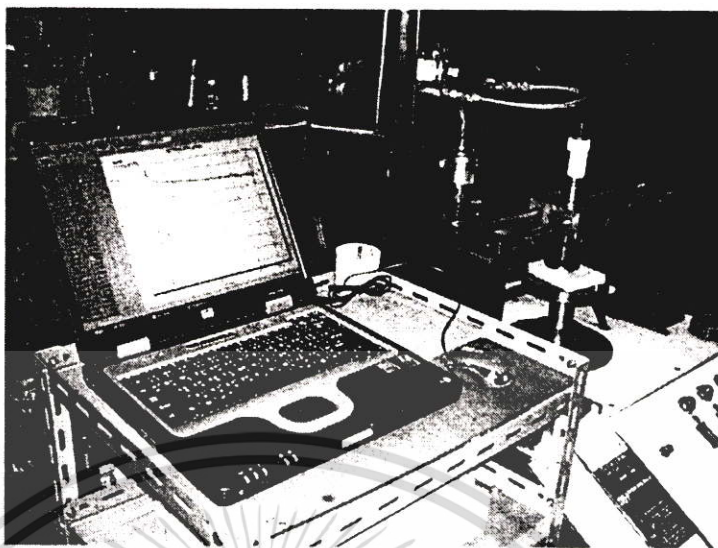
การวัดสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของวัสดุทั้ง 3 ชนิดที่ใช้ทำเฟืองซึ่งใช้ในการศึกษานี้อาศัยหลักการของ Friction torque โดยให้ชุดทดสอบซึ่งประยุกต์มาจากการทดสอบแบบ Pin on disc ดังรูปที่ 1.15 ซึ่งได้ติดตั้ง Strain gauge แบบวัดความเครียดเฉือน (Shear strain) รุ่น 6/120XY21 ของ HBM ซึ่งมีค่าความต้านทาน 120 โอห์ม  $\pm$  0.35% มีค่า Gauge factor  $2.02 \pm 1\%$  โดยต่อวงจรแบบ Full bridge ติดอยู่กับแกนของมอเตอร์ แรงบิดของชุดทดสอบนี้สามารถแปลงจากค่า output ของวงจรบริดจ์โดยใช้ค่าคงที่ซึ่งได้จากการทวนสอบแรงบิดในภาคผนวก ก ในการทดสอบนี้ใช้แหล่งจ่ายไฟแบบปรับค่าได้ (Regulator) ป้อนไฟให้มอเตอร์กระแสตรงเพื่อเอาชนะแรงบิดเนื่องจากความเสียดทานของวัสดุซึ่งสัมพันธ์กันและมีแรงกดโดยใช้น้ำหนักที่ทราบค่าจากการชั่ง ค่าแรงบิดขณะใดๆของมอเตอร์จะถูกบันทึกเป็นไฟล์ข้อมูลด้วยเครื่องจัดเก็บข้อมูล (Data logger) ซึ่งสามารถเรียกข้อมูลขึ้นมาทำการวิเคราะห์หาแรงบิดเพื่อคำนวณหาสัมประสิทธิ์ความเสียดทานได้ในภายหลัง เนื่องจากตัวเครื่องทดสอบเองมีความผิดเนื่องจากตลับลูกปืนดังนั้นจึงต้องทำการเดินเครื่องทดสอบแบบตัวเปล่าเพื่อหาค่าแรงบิดเนื่องจากความผิดของตลับลูกปืน ซึ่งจะนำค่านี้ไปคำนวณแรงบิดที่เอาชนะความเสียดทานของวัสดุได้ถูกต้องยิ่งขึ้น การทดสอบหาสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานเป็นไปดังรูปที่ 1.16

$$T = fFL \quad (4.1)$$



รูปที่ 4.15 หลักการของเครื่องทดสอบแรงบิดเนื่องจากความเสียดทานของวัสดุ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.16 การทดสอบหาสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน

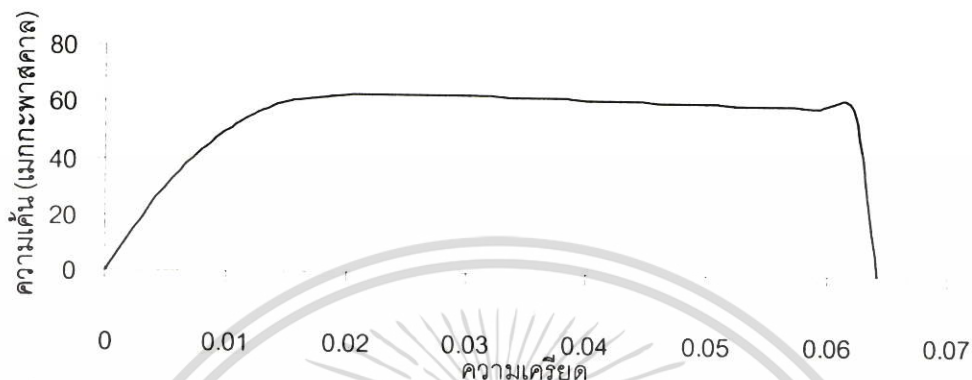


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

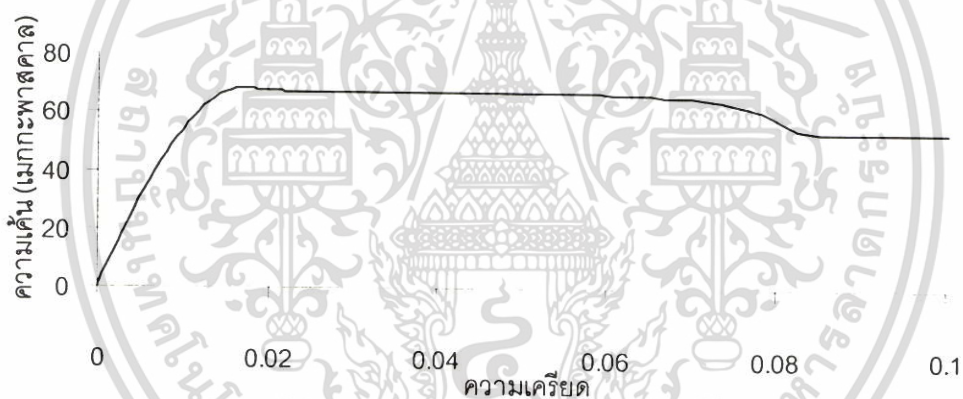
## บทที่ 5

# ผลการทดลองและการวิเคราะห์

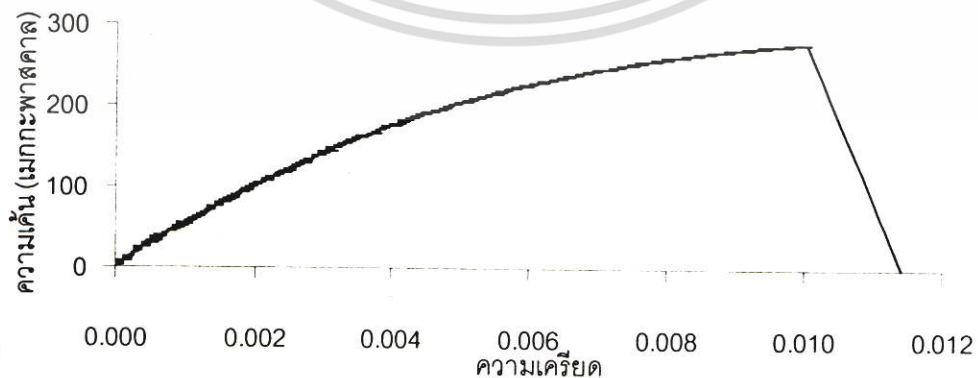
### 5.1 ผลการทดสอบแรงดึง



รูปที่ 5.1 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของโพลีเอทิลีนเทเรฟทาเลต



รูปที่ 5.2 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของโพลีโพรพิลีน



รูปที่ 5.3 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของเหล็กหล่อเบอร์ 30

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.1 ผลการทดสอบแรงดึง

วัสดุ	โมดูลัสของความยืดหยุ่น (เมกกะพาสคาล)				ความต้านทานแรงดึง (เมกกะพาสคาล)			
	ชั้นที่ 1	ชั้นที่ 2	ชั้นที่ 3	ค่าเฉลี่ย	ชั้นที่ 1	ชั้นที่ 2	ชั้นที่ 3	ค่าเฉลี่ย
โพลีเอทิลีน	2,766.3	2,772.1	2,766.0	2,768.1	63.548	62.898	63.256	63.234
โพลีเอไมด์	2,818.3	2,816.4	2,812.8	2,815.8	69.012	67.879	67.799	68.23
เหล็กหล่อเบอร์ 30	81,655.2	81,637.1	81,642.8	81,645.0	275.12	271.89	272.53	273.18

จากการทดสอบแรงดึงของวัสดุทั้ง 3 ชนิดพบว่าความต้านทานแรงดึงของโพลีเอไมด์สูงกว่าโพลีเอทิลีนประมาณ 8 % และโมดูลัสของความยืดหยุ่นของโพลีเอไมด์สูงกว่าโพลีเอทิลีนเล็กน้อยคือประมาณ 2 % ในขณะที่เมื่อเทียบกับเหล็กหล่อเบอร์ 30 แล้วพบว่าความต้านทานแรงดึงของเหล็กหล่อเบอร์ 30 สูงกว่าวัสดุทั้ง 2 ชนิดนี้ถึง 4 เท่าและโมดูลัสของความยืดหยุ่นของเหล็กหล่อเบอร์ 30 สูงกว่าวัสดุทั้ง 2 ชนิดนี้ถึง 29 เท่า การยึดตัวในช่วงพลาสติกของวัสดุโพลีเมอร์สูงกว่าเหล็กหล่อมากดังเห็นได้จากกราฟในรูปที่ 5.1 ถึง 5.3

## 5.2 ผลการทดสอบความแข็ง

ตารางที่ 5.2 ผลการทดสอบความแข็งแบบรีอคเวล

วัสดุ	ความแข็งรีอคเวล M ที่ตำแหน่ง					ค่าความแข็งเฉลี่ย
	1	2	3	4	5	
โพลีเอทิลีน	71.3	75.8	71.7	72.0	72.8	72.7
โพลีเอไมด์	55.9	62.3	56.3	56.1	55.7	57.3

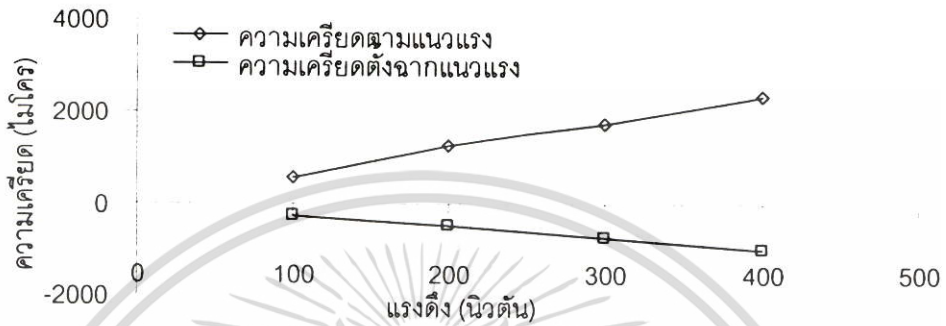
ตารางที่ 5.3 ผลการทดสอบความแข็งแบบบริเนล

วัสดุ	ความแข็งบริเนล ที่ตำแหน่ง					ค่าความแข็งเฉลี่ย
	1	2	3	4	5	
เหล็กหล่อเบอร์ 30	192	193	193	195	191	193

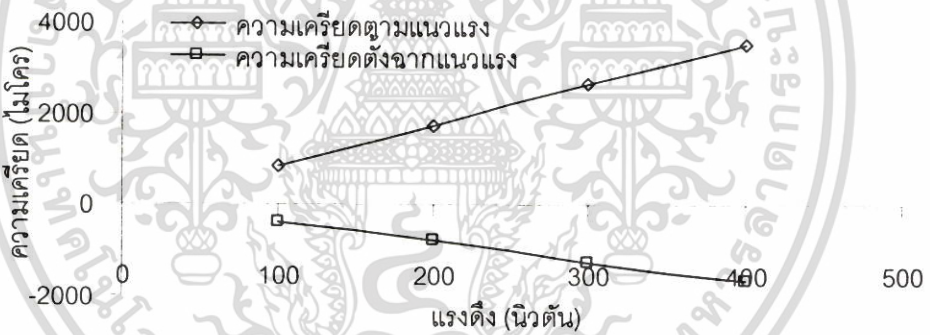
จากตารางที่ 5.2 พบว่าค่าความแข็งของวัสดุตัวอย่างค่อนข้างมีความสม่ำเสมอค่าความแตกต่างไม่เกิน 1% ในแต่ละแนวที่วัดค่าความแข็ง ค่าความแข็งจะสูงที่สุดที่จุดกึ่งกลางซึ่งเป็นแกนของแท่ง เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วัสดุค่าความแข็งเฉลี่ยของโพลีเอทิลีนสูงกว่าโพลีเอไมด์ประมาณ 27% และจากตารางที่ 5.3 ค่าความแข็งแบบบรินเนลของเหล็กหล่อเบอร์ 30 ค่อนข้างมีความสม่ำเสมอค่าความแตกต่างไม่เกิน 1.5 % และมีค่าความแข็งเฉลี่ยเท่ากับ 193 HB

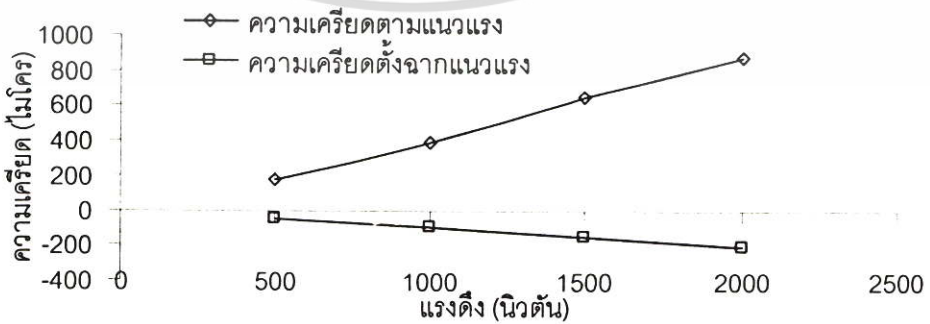
5.3 ผลการทดสอบหาอัตราส่วนปัวซอง



รูปที่ 5.4 การทดลองหาอัตราส่วนปัวซองของโพลีเอทิลีน



รูปที่ 5.5 การทดลองหาอัตราส่วนปัวซองของโพลีเอไมด์



รูปที่ 5.6 การทดลองหาอัตราส่วนปัวซองของเหล็กหล่อเบอร์ 30

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.4 ผลการทดสอบอัตราส่วนปัวของของโพลีเอทิลีน

แรงดึง (นิวตัน)	ความเครียดตามแนวแรง (ไมโคร)	ความเครียดตั้งฉากแนวแรง (ไมโคร)	อัตราส่วนปัวของ
100	586	-244	0.42
200	1240	-495	0.40
300	1759	-759	0.43
400	2369	-1014	0.43
ค่าเฉลี่ย			0.42

ตารางที่ 5.5 ผลการทดสอบอัตราส่วนปัวของของโพลีเอไมด์

แรงดึง (นิวตัน)	ความเครียดตามแนวแรง (ไมโคร)	ความเครียดตั้งฉากแนวแรง (ไมโคร)	อัตราส่วนปัวของ
100	828	-378	0.46
200	1732	-784	0.45
300	2625	-1243	0.47
400	3526	-1667	0.47
ค่าเฉลี่ย			0.46

ตารางที่ 5.6 ผลการทดสอบอัตราส่วนปัวของของเหล็กหล่อเบอร์ 30

แรงดึง (นิวตัน)	ความเครียดตามแนวแรง (ไมโคร)	ความเครียดตั้งฉากแนวแรง (ไมโคร)	อัตราส่วนปัวของ
500	171	-50	0.29
1000	391	-100	0.26
1500	654	-152	0.23
2000	880	-212	0.24
ค่าเฉลี่ย			0.26

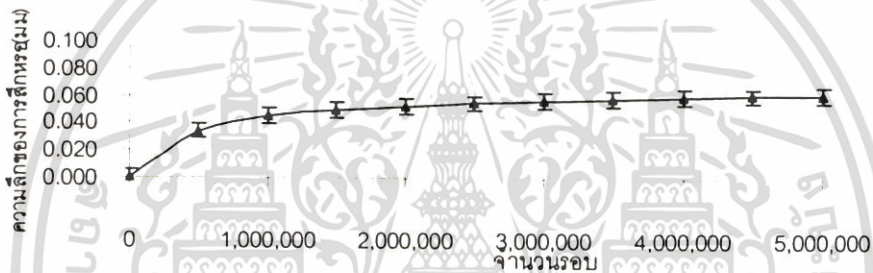
จากการทดลองหาอัตราส่วนปัวของของโพลีเอทิลีน, โพลีเอไมด์ และเหล็กหล่อเบอร์ 30 ดังรูปที่ 5.4, 5.5 และ 5.6 โดยใช้แรงทดสอบในช่วงยืดหยุ่นกับวัสดุทั้ง 3 ชนิด พบว่าอัตราส่วนปัวของซึ่งเป็นอัตราส่วนของความเครียดในแนวตั้งฉากแนวแรงต่อความเครียดในแนวแรงของโพลีเอทิลีน โพลีเอไมด์ และเหล็กหล่อเบอร์ 30 มีค่าค่อนข้างคงที่และมีค่าโดยเฉลี่ยเท่ากับ 0.42, 0.46

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

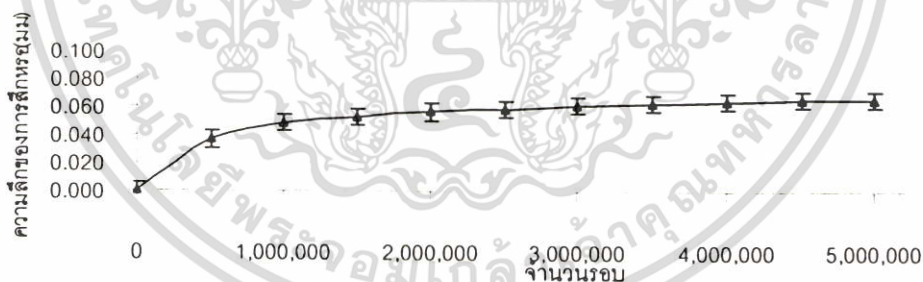
และ 0.26 ตามลำดับดังสรุปไว้ในตารางที่ 5.4, 5.5 และ 5.6 นั่นคือการยึดตัวในทิศทางตั้งฉากแนวแรงของโพลีเอทิลีนและ โพลีเอไมด์จะสูงกว่าเหล็กหล่อประมาณ 1.7 เท่า โดยทั่วไปแล้วมักใช้ค่าอัตราส่วนปัวซองของเหล็กเท่ากับ 0.28 – 0.3 และอัตราส่วนปัวซองของวัสดุโพลีเมอร์เท่ากับ 0.4 นั่นคืออัตราส่วนปัวซองของเหล็กหล่อเบอร์ 30 ที่ได้จากการทดลองนี้ต่ำกว่าค่าทั่วไปอยู่เล็กน้อย ในขณะที่อัตราส่วนปัวซองของโพลีเอทิลีนและ โพลีเอไมด์ที่ได้จากการทดลองนี้สูงกว่าค่าโดยทั่วไป

#### 5.4 การสีกหรือเฉลี่ย

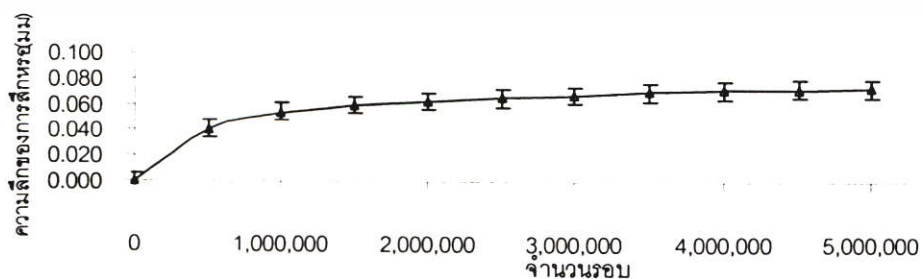
เมื่อนำข้อมูลที่ได้จากการทดสอบการสีกหรือในตารางที่ ข.1 ถึง ข.27 ในภาคผนวก ข มาพลอตกับจำนวนรอบที่ทดสอบโดยแสดงช่วงของค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐานบนกราฟจะได้ดังรูปที่ 5.7 ถึง 5.33



รูปที่ 5.7 การสีกหรือของเฟืองโพลีเอทิลีน ที่สภาวะ SR = 0.25 , 1,000 รอบต่อนาที

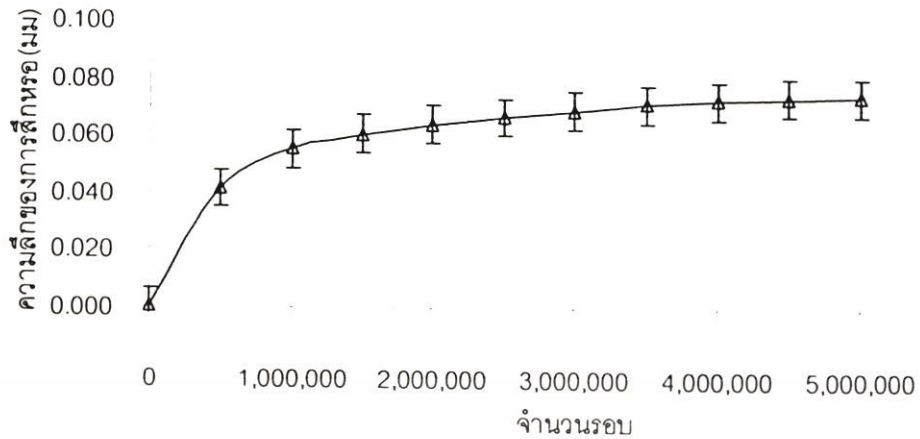


รูปที่ 5.8 การสีกหรือของเฟืองโพลีเอทิลีน ที่สภาวะ SR = 0.25 , 1,500 รอบต่อนาที

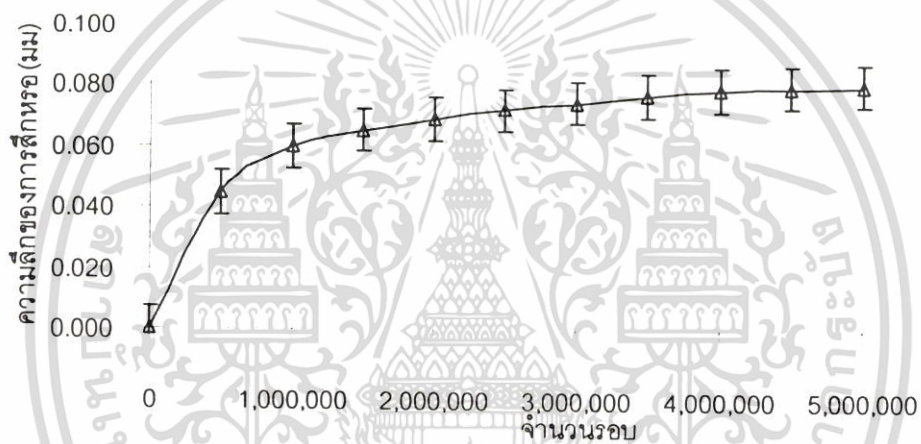


รูปที่ 5.9 การสีกหรือของเฟืองโพลีเอทิลีน ที่สภาวะ SR = 0.25 , 2,000 รอบต่อนาที

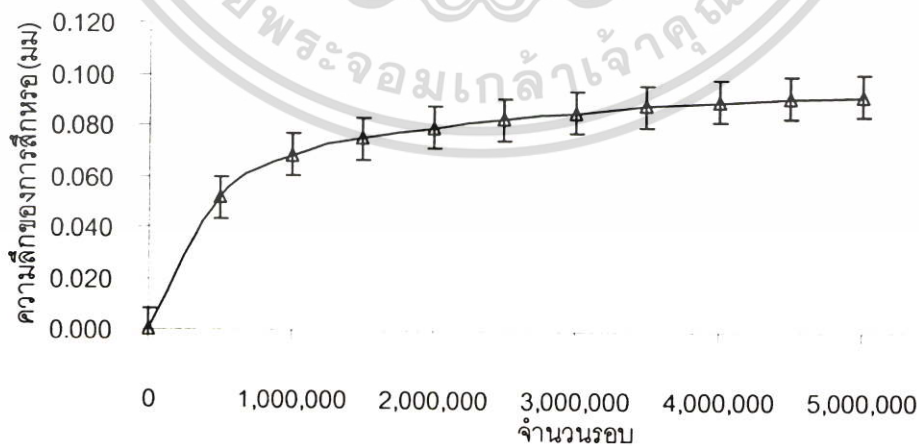
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.10 การฝึกหัดของเฟืองโพลีอ็อกซิเมทิลีน ที่สภาวะ  $SR = 0.5$  , 1,000 รอบต่อนาที

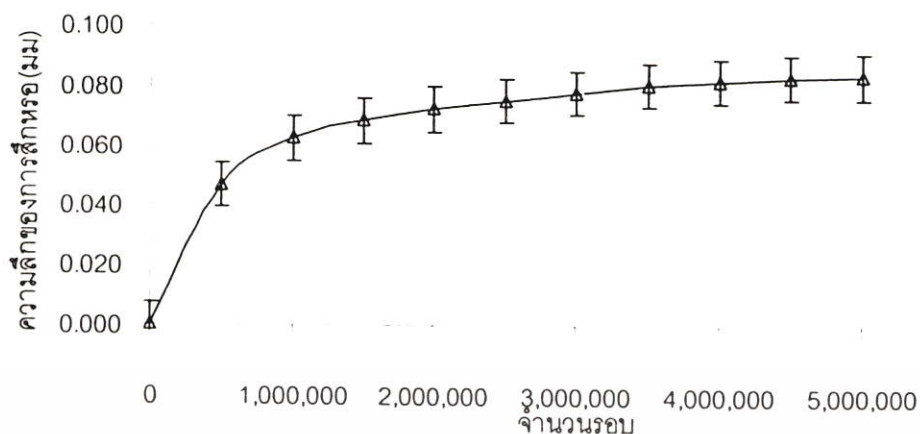


รูปที่ 5.11 การฝึกหัดของเฟืองโพลีอ็อกซิเมทิลีน ที่สภาวะ  $SR = 0.5$  , 1,500 รอบต่อนาที

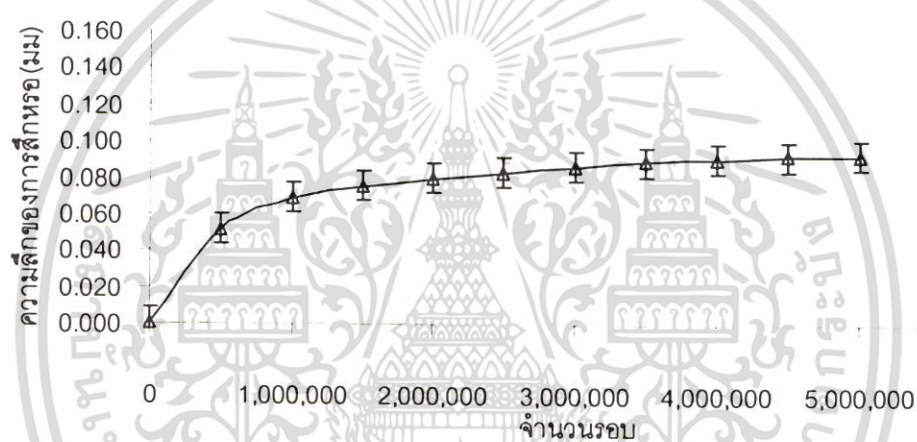


รูปที่ 5.12 การฝึกหัดของเฟืองโพลีอ็อกซิเมทิลีน ที่สภาวะ  $SR = 0.5$  , 2,000 รอบต่อนาที

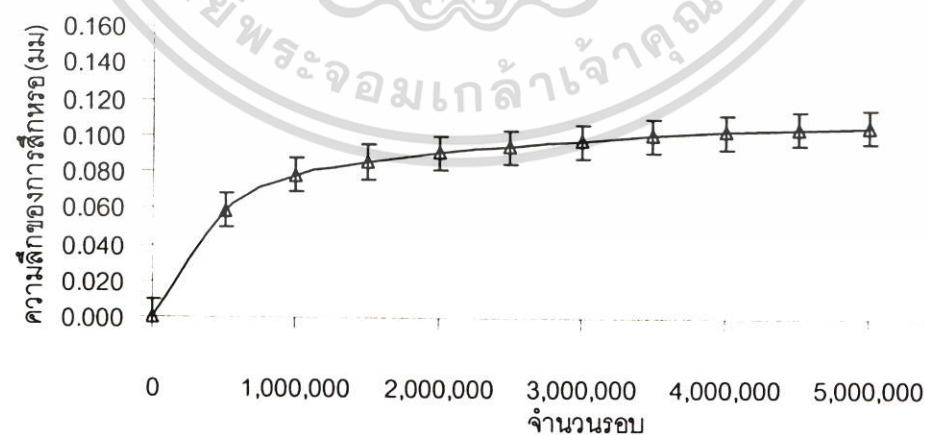
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.13 การสีกหรอของเฟืองโพลีเอทิลีนที่สภาวะ SR = 0.75 , 1,000 รอบต่อนาที

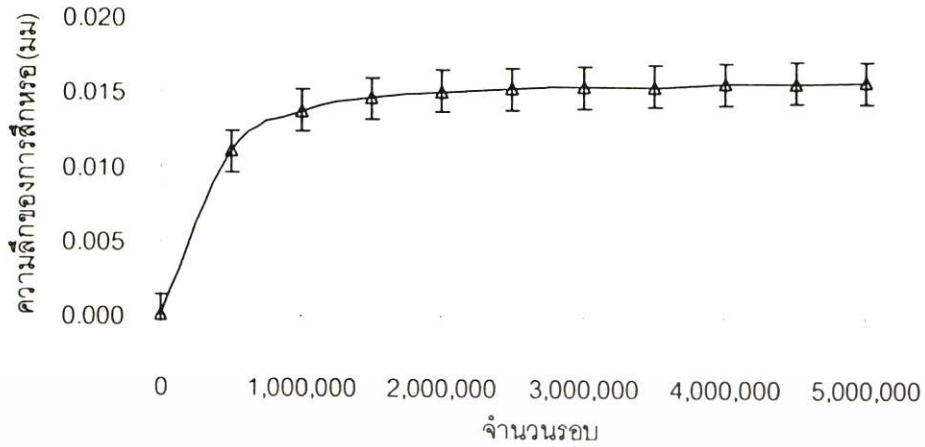


รูปที่ 5.14 การสีกหรอของเฟืองโพลีเอทิลีนที่สภาวะ SR = 0.75 , 1,500 รอบต่อนาที

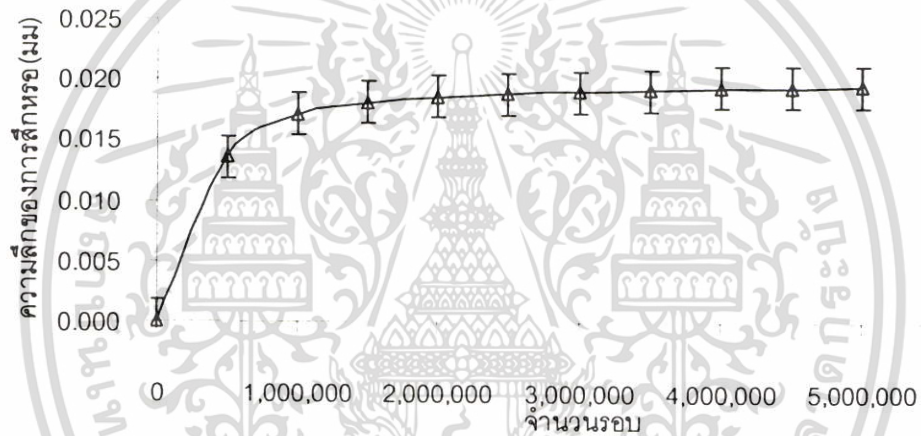


รูปที่ 5.15 การสีกหรอของเฟืองโพลีเอทิลีนที่สภาวะ SR = 0.75 , 2,000 รอบต่อนาที

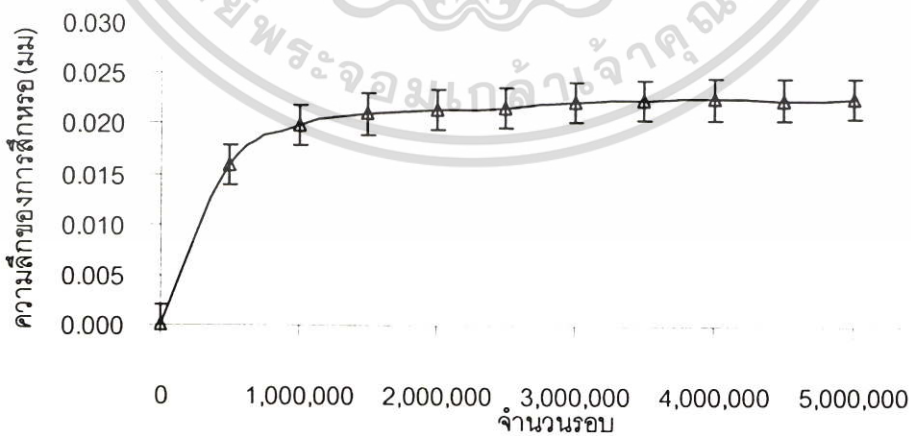
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.16 การสีกหรอของเฟืองโพลีเอไมด์ ที่สภาวะ SR = 0.25 , 1,000 รอบต่อนาที

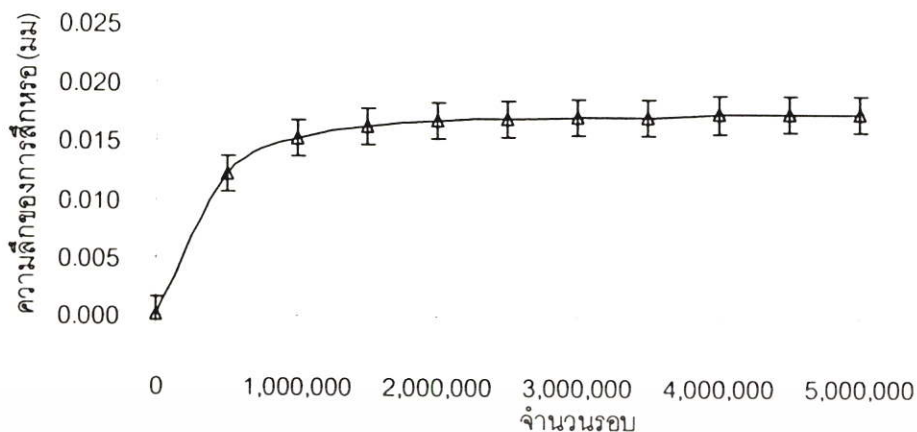


รูปที่ 5.17 การสีกหรอของเฟืองโพลีเอไมด์ ที่สภาวะ SR = 0.25 , 1,500 รอบต่อนาที

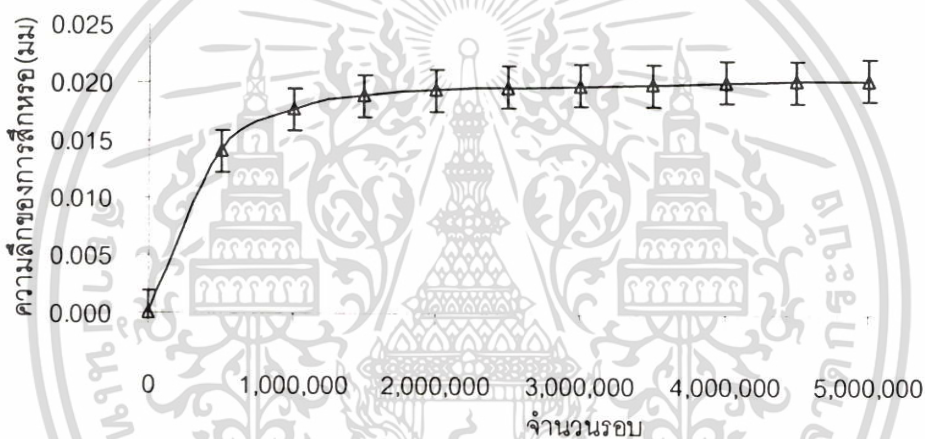


รูปที่ 5.18 การสีกหรอของเฟืองโพลีเอไมด์ ที่สภาวะ SR = 0.25 , 2,000 รอบต่อนาที

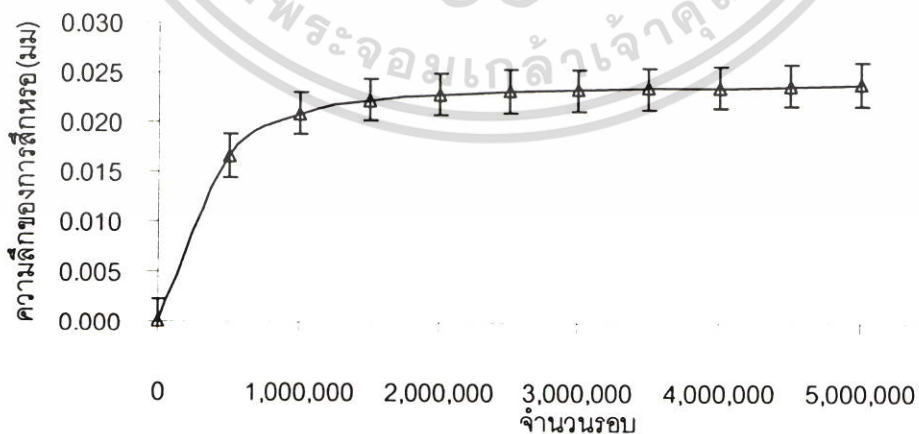
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.19 การสีกหรถของเฟืองโพลีเอไมด์ ที่สภาวะ SR = 0.5 , 1,000 รอบต่อนาที

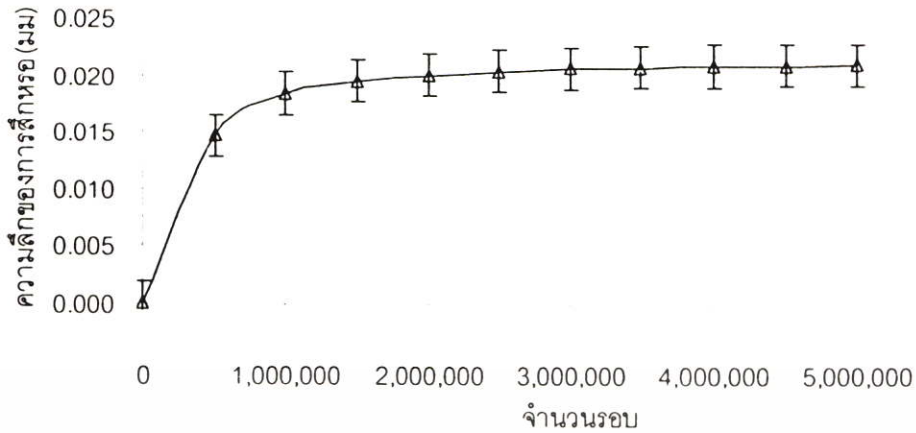


รูปที่ 5.20 การสีกหรถของเฟืองโพลีเอไมด์ ที่สภาวะ SR = 0.5 , 1,500 รอบต่อนาที

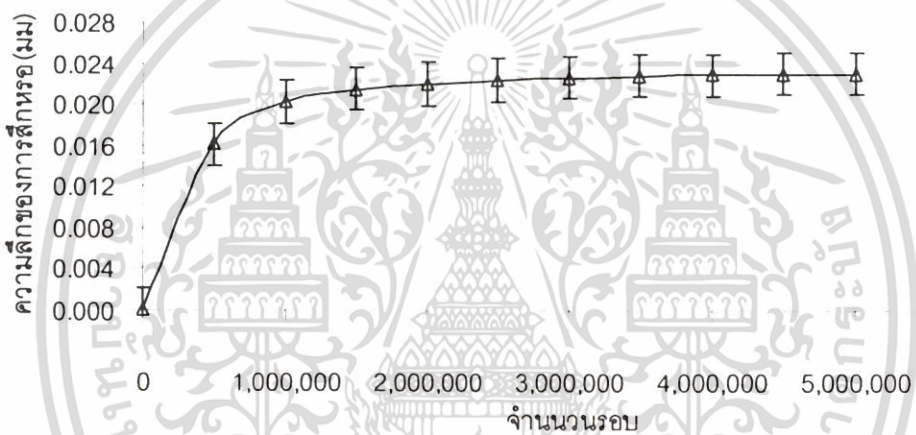


รูปที่ 5.21 การสีกหรถของเฟืองโพลีเอไมด์ ที่สภาวะ SR = 0.5 , 2,000 รอบต่อนาที

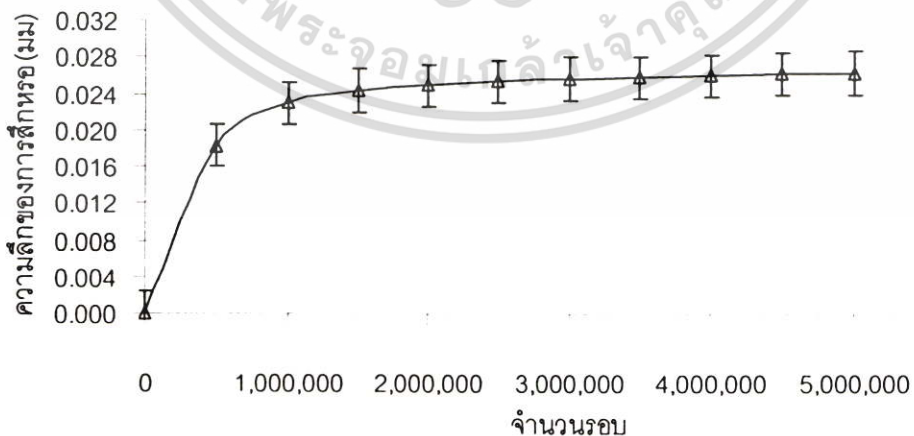
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.22 การสึกหรอของเฟืองโพลีเอไมด์ ที่สภาวะ SR = 0.75 , 1,000 รอบต่อนาที

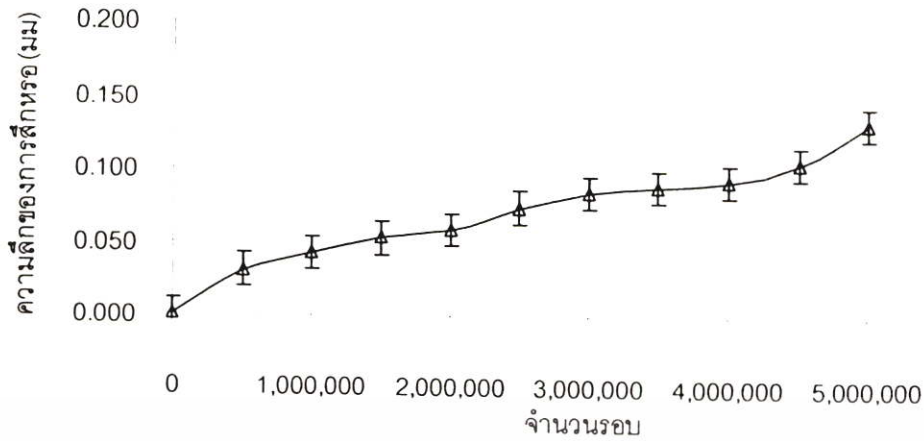


รูปที่ 5.23 การสึกหรอของเฟืองโพลีเอไมด์ ที่สภาวะ SR = 0.75 , 1,500 รอบต่อนาที

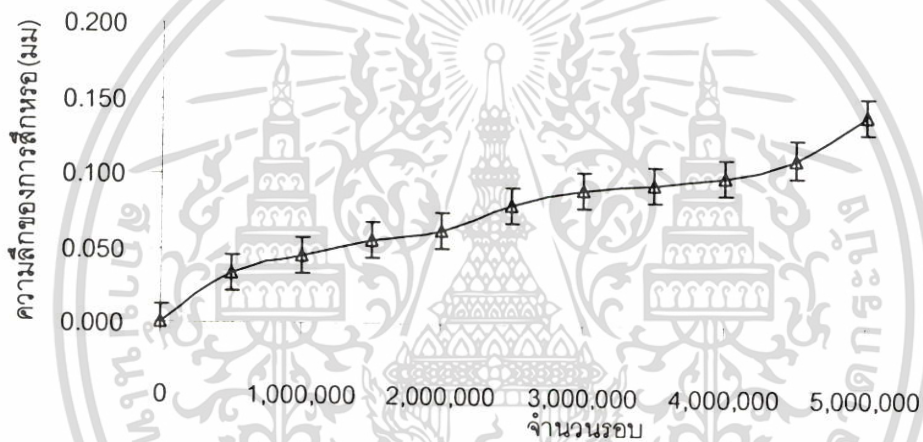


รูปที่ 5.24 การสึกหรอของเฟืองโพลีเอไมด์ ที่สภาวะ SR = 0.75 , 2,000 รอบต่อนาที

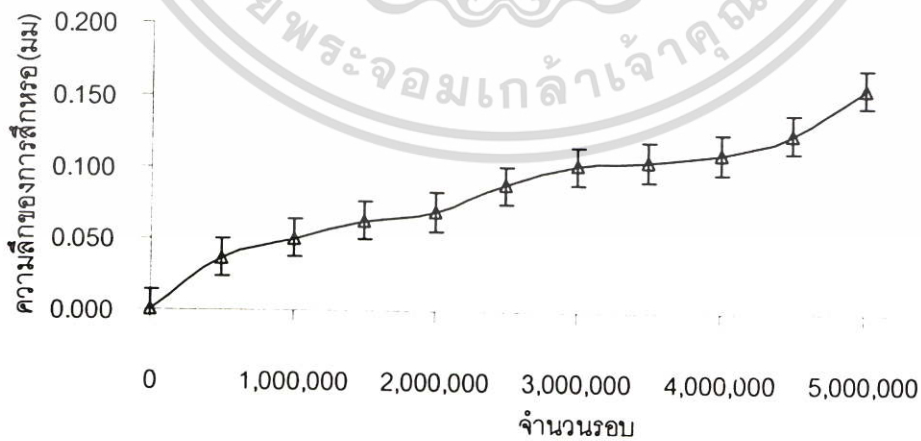
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.25 การสึกหรอของเฟืองเหล็กหล่อเบอร์ 30 ที่สภาวะ  $SR = 0.25$  , 1,000 รอบต่อนาที

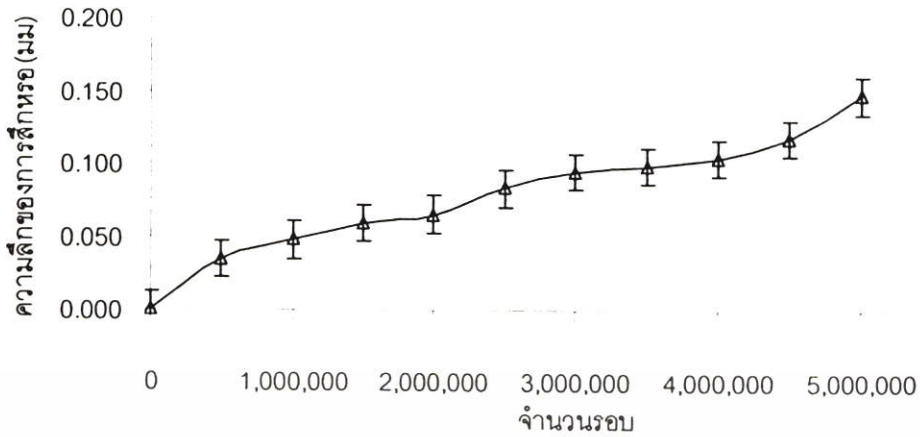


รูปที่ 5.26 การสึกหรอของเฟืองเหล็กหล่อเบอร์ 30 ที่สภาวะ  $SR = 0.25$  , 1,500 รอบต่อนาที

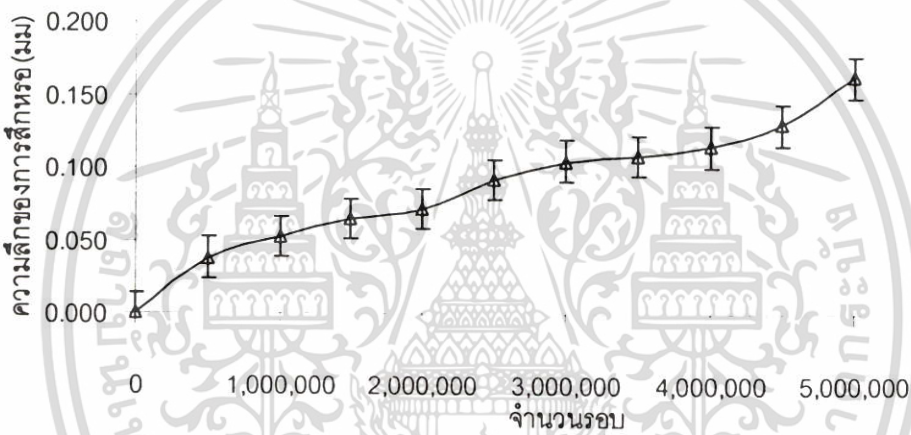


รูปที่ 5.27 การสึกหรอของเฟืองเหล็กหล่อเบอร์ 30 ที่สภาวะ  $SR = 0.25$  , 2,000 รอบต่อนาที

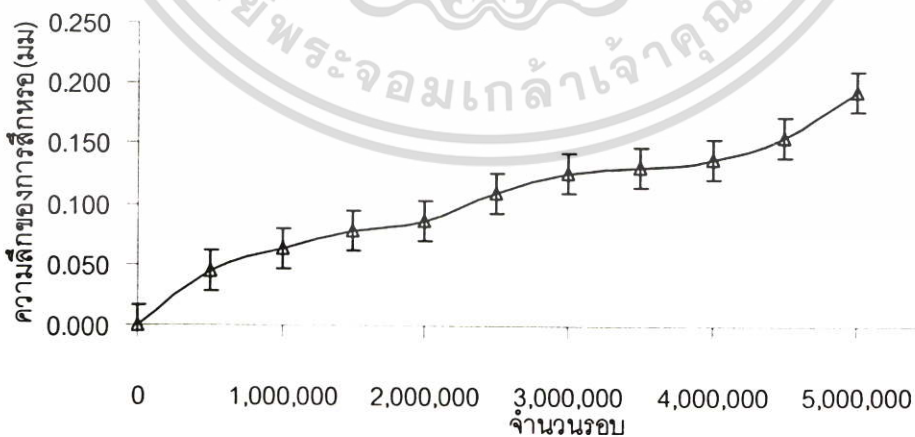
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.28 การฝึกหัดของเฟืองเหล็กหล่อเบอร์ 30 ที่สภาวะ  $SR = 0.5$  , 1,000 รอบต่อนาที

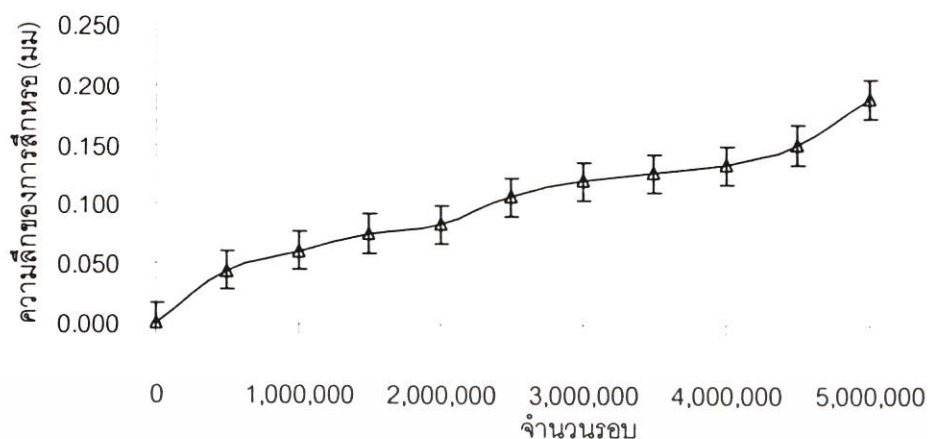


รูปที่ 5.29 การฝึกหัดของเฟืองเหล็กหล่อเบอร์ 30 ที่สภาวะ  $SR = 0.5$  , 1,500 รอบต่อนาที

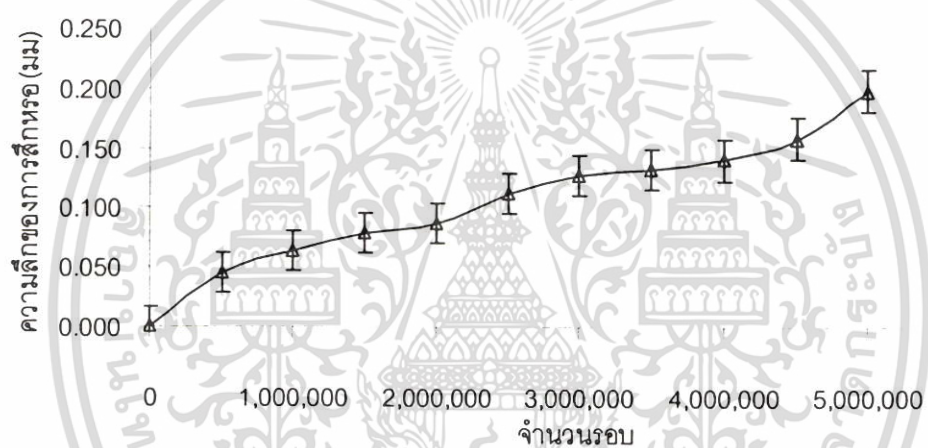


รูปที่ 5.30 การฝึกหัดของเฟืองเหล็กหล่อเบอร์ 30 ที่สภาวะ  $SR = 0.5$  , 2,000 รอบต่อนาที

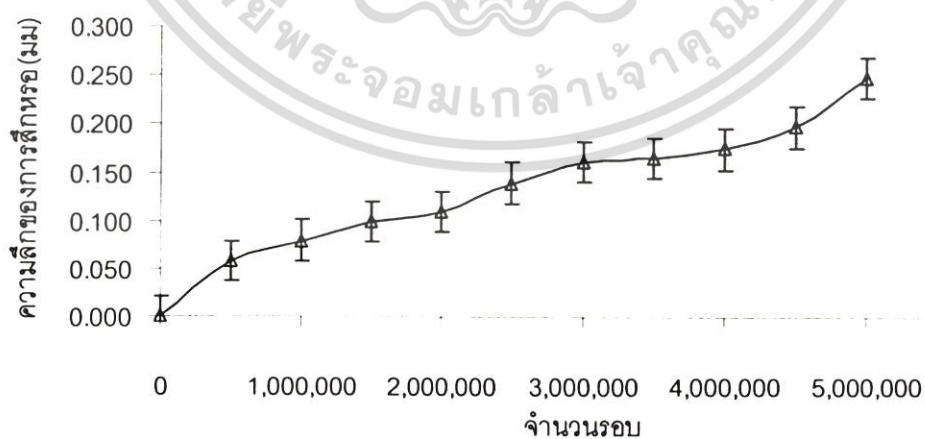
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.31 การสึกหรอของเฟืองเกลิกหล่อเบอร์ 30 ที่สภาวะ SR = 0.75 , 1,000 รอบต่อนาที



รูปที่ 5.32 การสึกหรอของเฟืองเกลิกหล่อเบอร์ 30 ที่สภาวะ SR = 0.75 , 1,500 รอบต่อนาที



รูปที่ 5.33 การสึกหรอของเฟืองเกลิกหล่อเบอร์ 30 ที่สภาวะ SR = 0.75 , 2,000 รอบต่อนาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

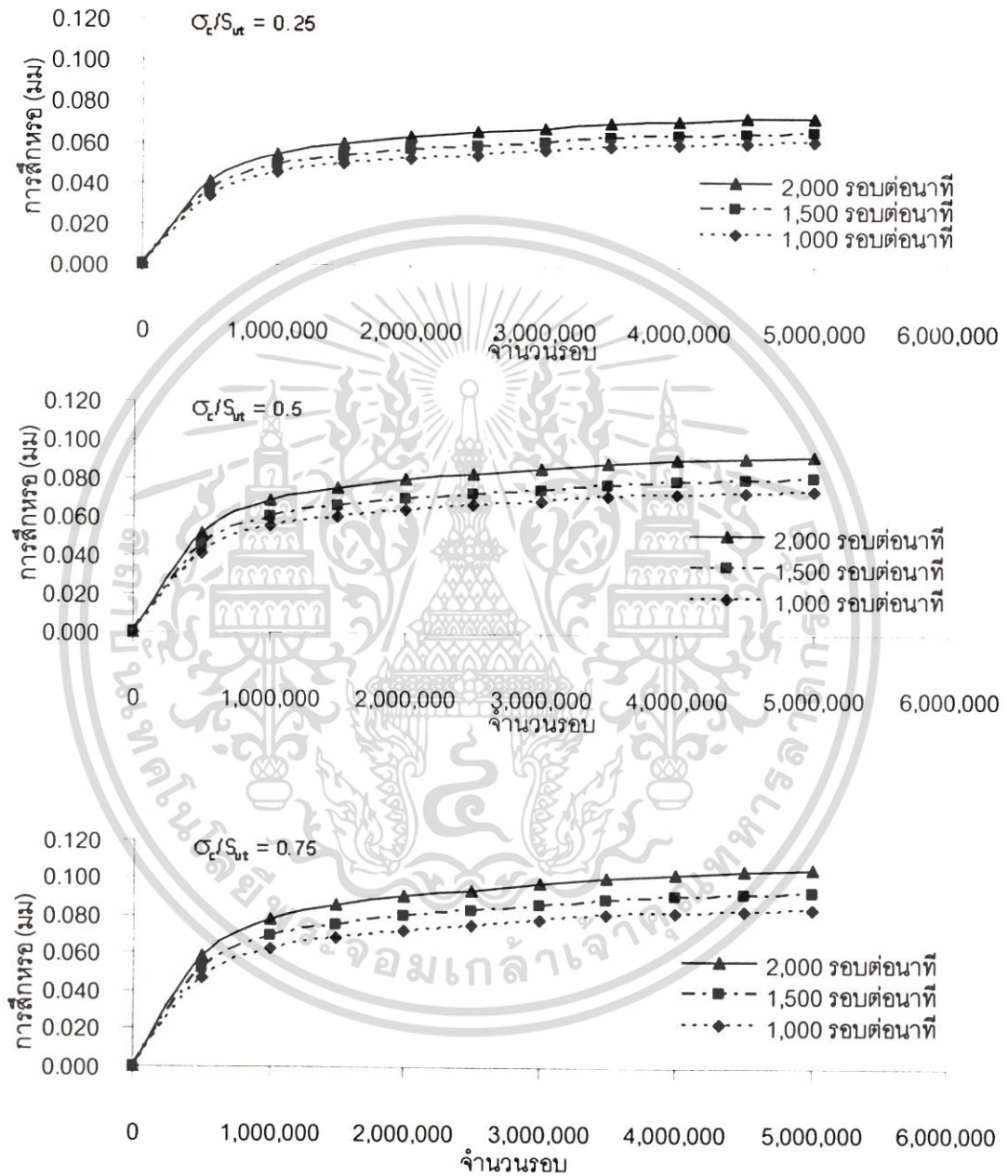
เมื่อพิจารณารูปที่ 5.7 ถึง 5.15 พบว่าเฟืองโพลีอ็อกซิเมทิลีนจะสึกหรอเร็วในช่วงแรกทีประมาณ 1 ล้านรอบจากนั้นการสึกหรอจะเกิดขึ้นในอัตราที่ลดลง เมื่อความเร็วรอบสูงขึ้นการสึกหรอจะเกิดมากขึ้นเนื่องจากการเคลื่อนที่แบบถู (Sliding) มากขึ้นและเมื่ออัตราส่วนความเค้นเพิ่มขึ้นการสึกหรอจะเกิดมากขึ้นเช่นกันซึ่งสอดคล้องกับสมการการสึกหรอของ Archard โดยการสึกหรอมากที่สุดคือที่สภาวะอัตราส่วนความเค้น 0.75 และความเร็วรอบ 2,000 รอบต่อนาทีเมื่อครบ 5 ล้านรอบมีความลึกของการสึกหรอมากที่สุดประมาณ 0.1 มิลลิเมตร ภาพร่องรอยการสึกหรอของเฟืองโพลีอ็อกซิเมทิลีนอยู่ในภาคผนวก ข รูปที่ ข.1

จากรูปที่ 5.16 ถึง 5.24 จะพบว่าเฟืองโพลิเอไมด์จะสึกหรอเร็วในช่วงแรกทีประมาณ 5 แสนถึง 1 ล้านรอบจากนั้นการสึกหรอจะเกิดขึ้นในอัตราที่ลดลงซึ่งเป็นแนวโน้มคล้ายกันกับเฟืองโพลีอ็อกซิเมทิลีนแต่ต่ำกว่าโพลีอ็อกซิเมทิลีนดังจะเห็นได้จากความชันของกราฟการสึกหรอจะต่ำกว่า เมื่อความเร็วรอบสูงขึ้นการสึกหรอจะเกิดมากขึ้นและเมื่ออัตราส่วนความเค้นเพิ่มขึ้นการสึกหรอจะเกิดมากขึ้นเช่นกัน ซึ่งเป็นแนวโน้มเดียวกันกับเฟืองโพลีอ็อกซิเมทิลีนแต่การสึกหรอของโพลิเอไมด์จะต่ำกว่ามาก โดยการสึกหรอมากที่สุดคือที่สภาวะอัตราส่วนความเค้น 0.75 และความเร็วรอบ 2,000 รอบต่อนาทีเมื่อครบ 5 ล้านรอบมีความลึกของการสึกหรอมากที่สุดประมาณ 0.025 มิลลิเมตร ภาพร่องรอยการสึกหรอของเฟืองโพลิเอไมด์อยู่ในภาคผนวก ข รูปที่ ข.2

จากรูปที่ 5.25 ถึง 5.33 จะพบว่าเฟืองเหล็กหล่อเบอร์ 30 จะสึกหรอเร็วในช่วงแรกทีประมาณ 5 แสนถึง 1 ล้านรอบจากนั้นการสึกหรอจะเกิดขึ้นสูงและลดลงมีลักษณะเป็นช่วงๆ เมื่อความเร็วรอบสูงขึ้นการสึกหรอจะเกิดมากขึ้นและเมื่ออัตราส่วนความเค้นเพิ่มขึ้นการสึกหรอจะเกิดมากขึ้นเช่นกันซึ่งมีแนวโน้มคล้ายกันกับเฟืองโพลีอ็อกซิเมทิลีนและโพลิเอไมด์แต่จะเกิดในอัตราที่สูงกว่ามาก ลักษณะการสึกหรอของเฟืองเหล็กหล่อเบอร์ 30 มีความแตกต่างจากเฟืองโพลีอ็อกซิเมทิลีนและโพลิเอไมด์อย่างมากคือเมื่อจำนวนรอบสูงขึ้นการสึกหรอจะเกิดมากขึ้นโดยไม่มีแนวโน้มว่าจะลดลงหรือคงที่ และเกิดเสียงดังในระหว่างทดสอบซึ่งเกิดจากการกระทบกันของซี่ฟันเฟืองโดยการสึกหรอมากที่สุดคือที่สภาวะอัตราส่วนความเค้น 0.75 และความเร็วรอบ 2,000 รอบต่อนาทีเมื่อครบ 5 ล้านรอบมีความลึกของการสึกหรอมากที่สุดประมาณ 0.25 มิลลิเมตร ภาพร่องรอยการสึกหรอของเฟืองเหล็กหล่อเบอร์ 30 อยู่ในภาคผนวก ข รูปที่ ข.3

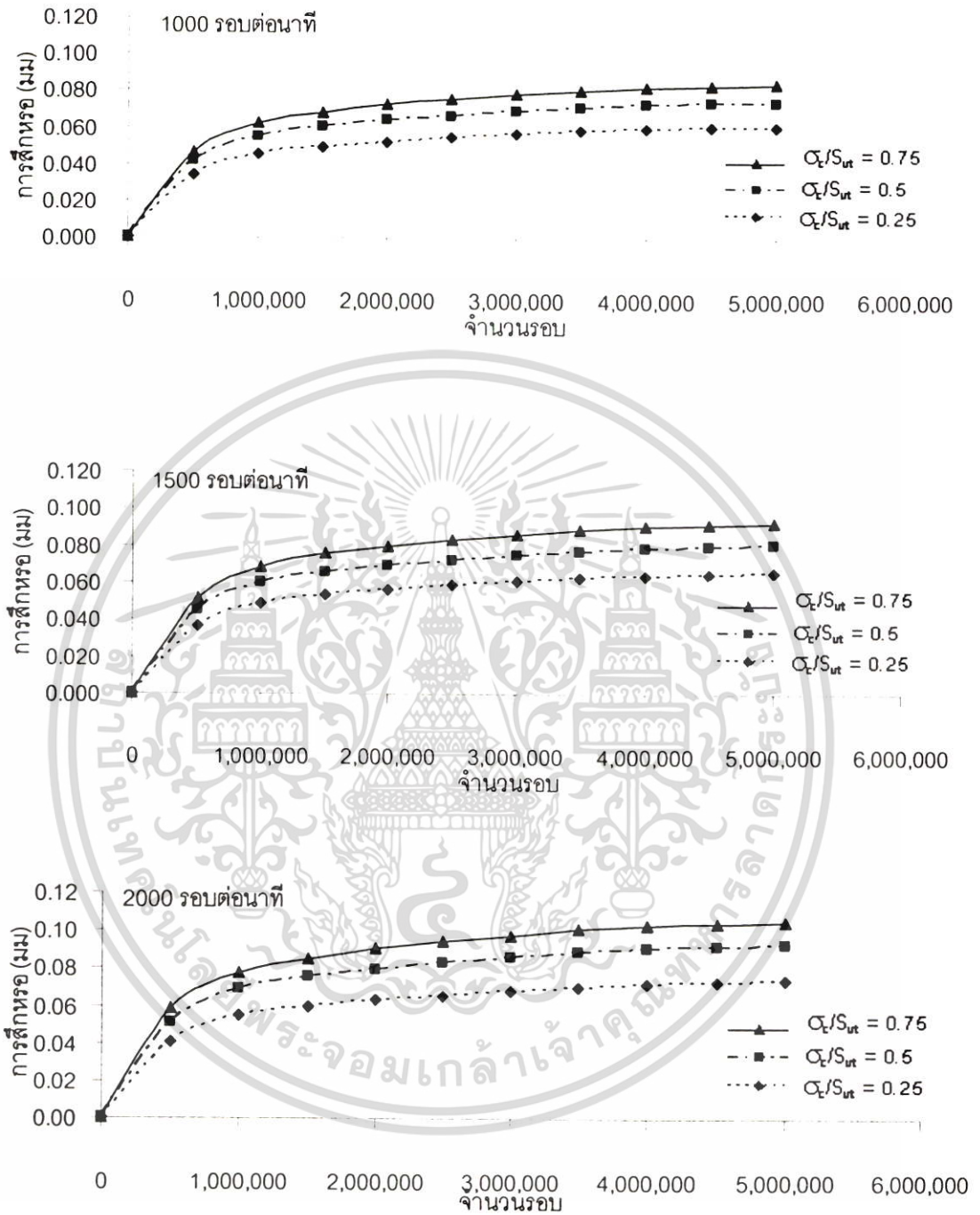
## 5.5 การวิเคราะห์ผลของอัตราส่วนความเค้นและความเร็วรอบ

เมื่อนำการกราฟลึกรหรือเฉลี่ยของแต่ละวัสดุมาพลอตบนกราฟเดียวกันเพื่อดูผลของความเร็วยรอบและผลของอัตราส่วนความเค้นที่มีต่อการลึกรหรือจะด้ดังรูปที่ 5.34 ถึง 5.39



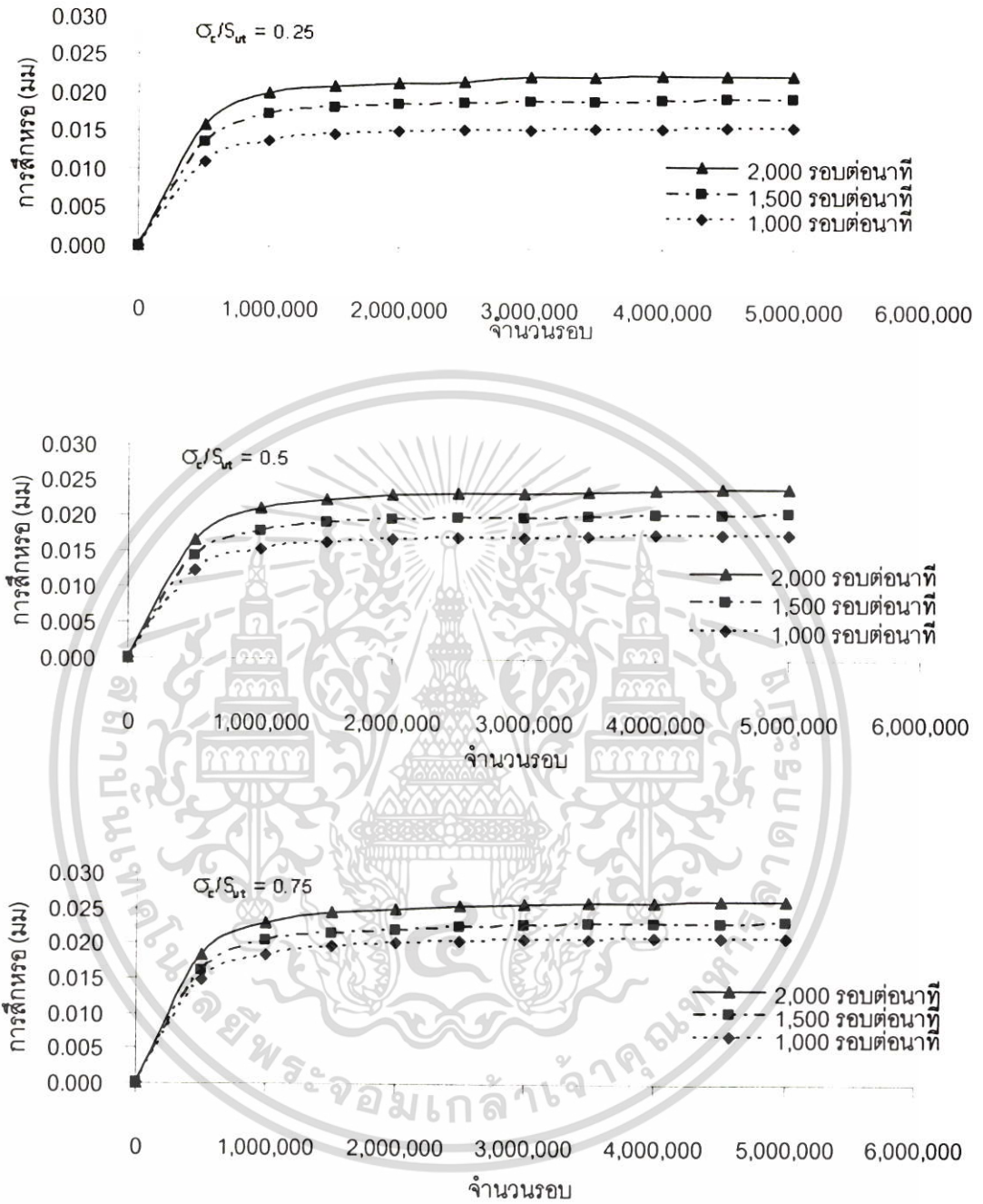
รูปที่ 5.34 กราฟแสดงผลของความเร็วยรอบต่อการลึกรหรือของโพลีเอทิลีน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



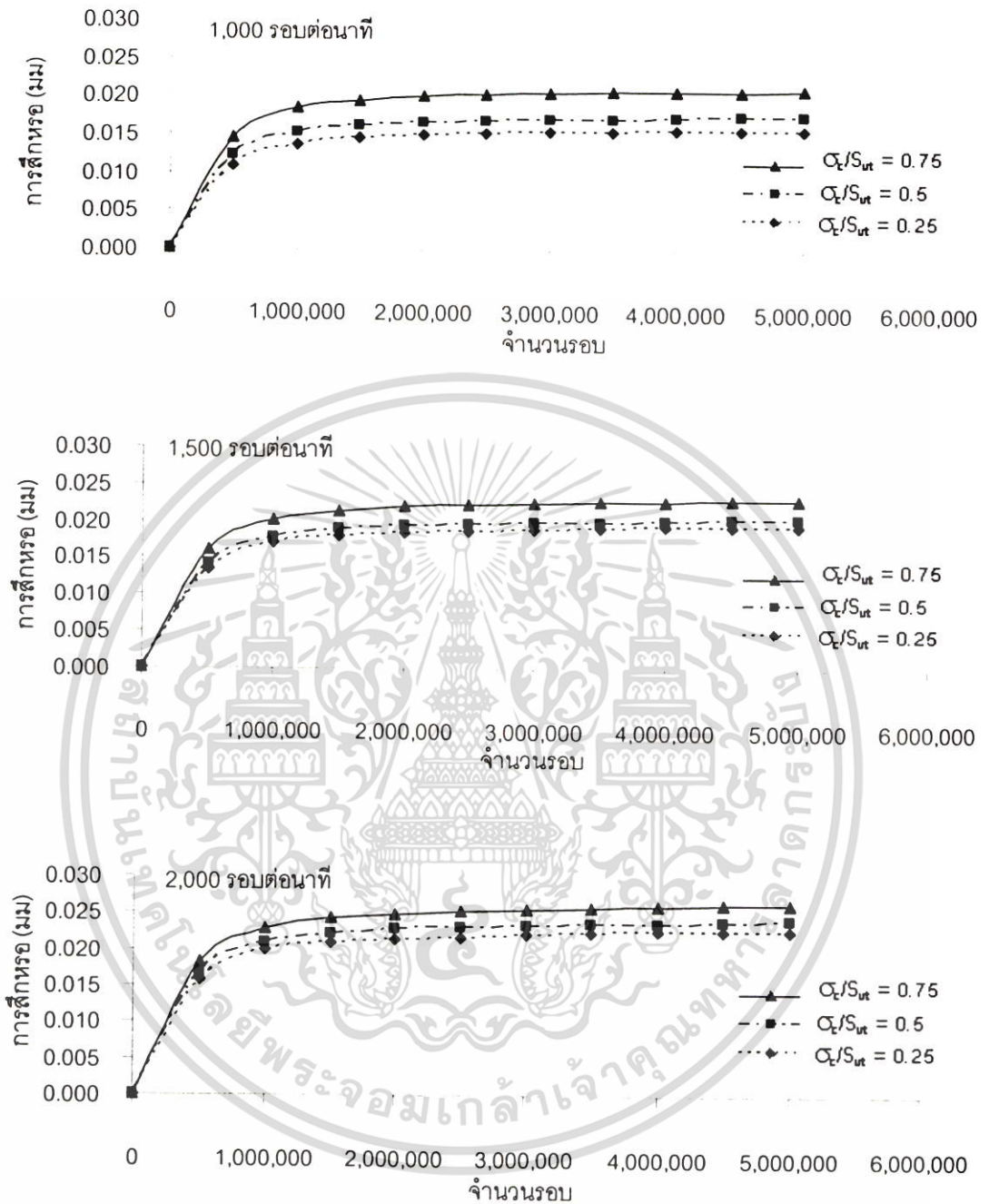
รูปที่ 5.35 กราฟแสดงผลของอัตราส่วนความเค้นต่อการสึกหรอของโพลีเอทิลีน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



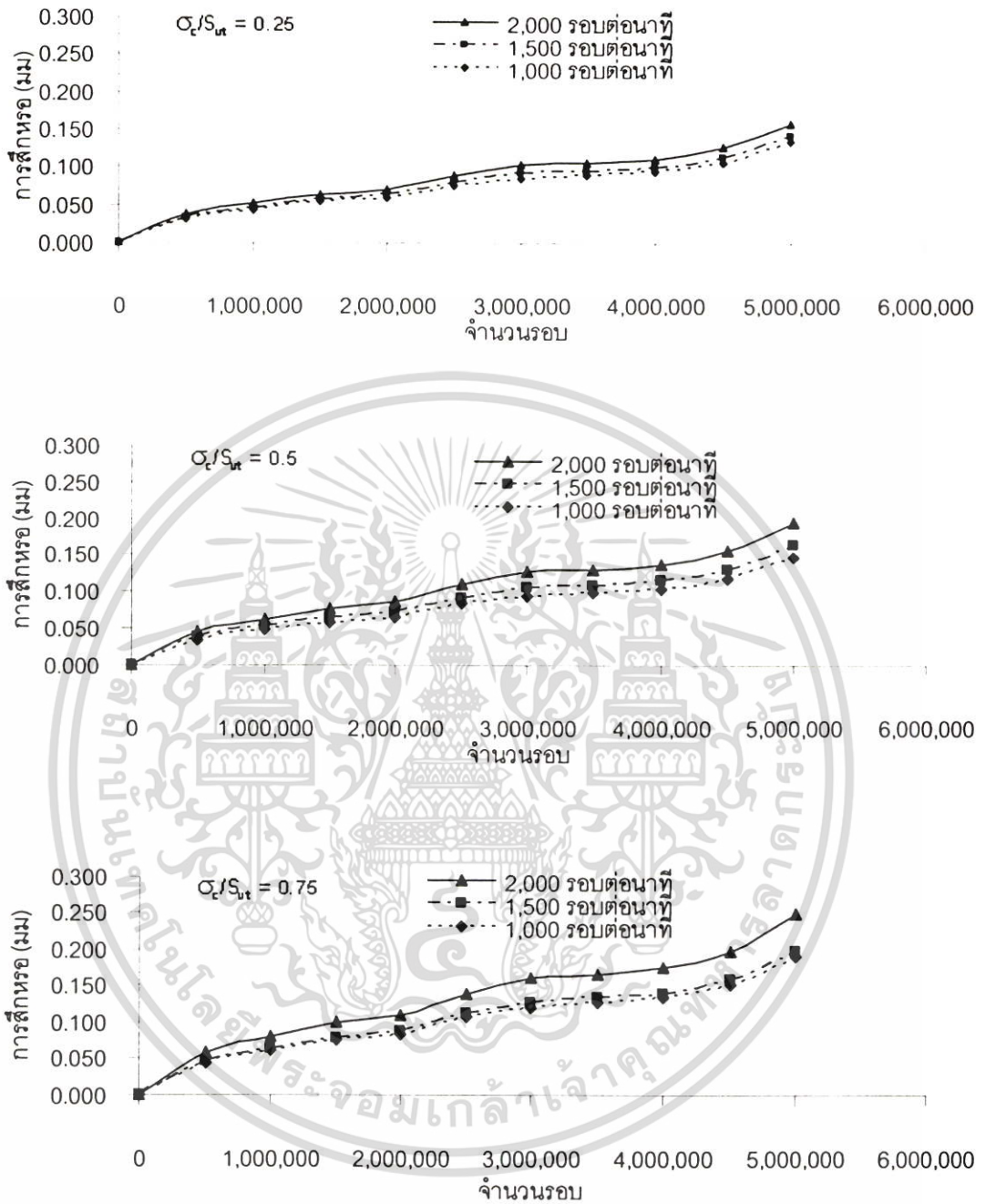
รูปที่ 5.36 กราฟแสดงผลของความเร็วยกต่อการสึกหกรงของโพลีเอไมด์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



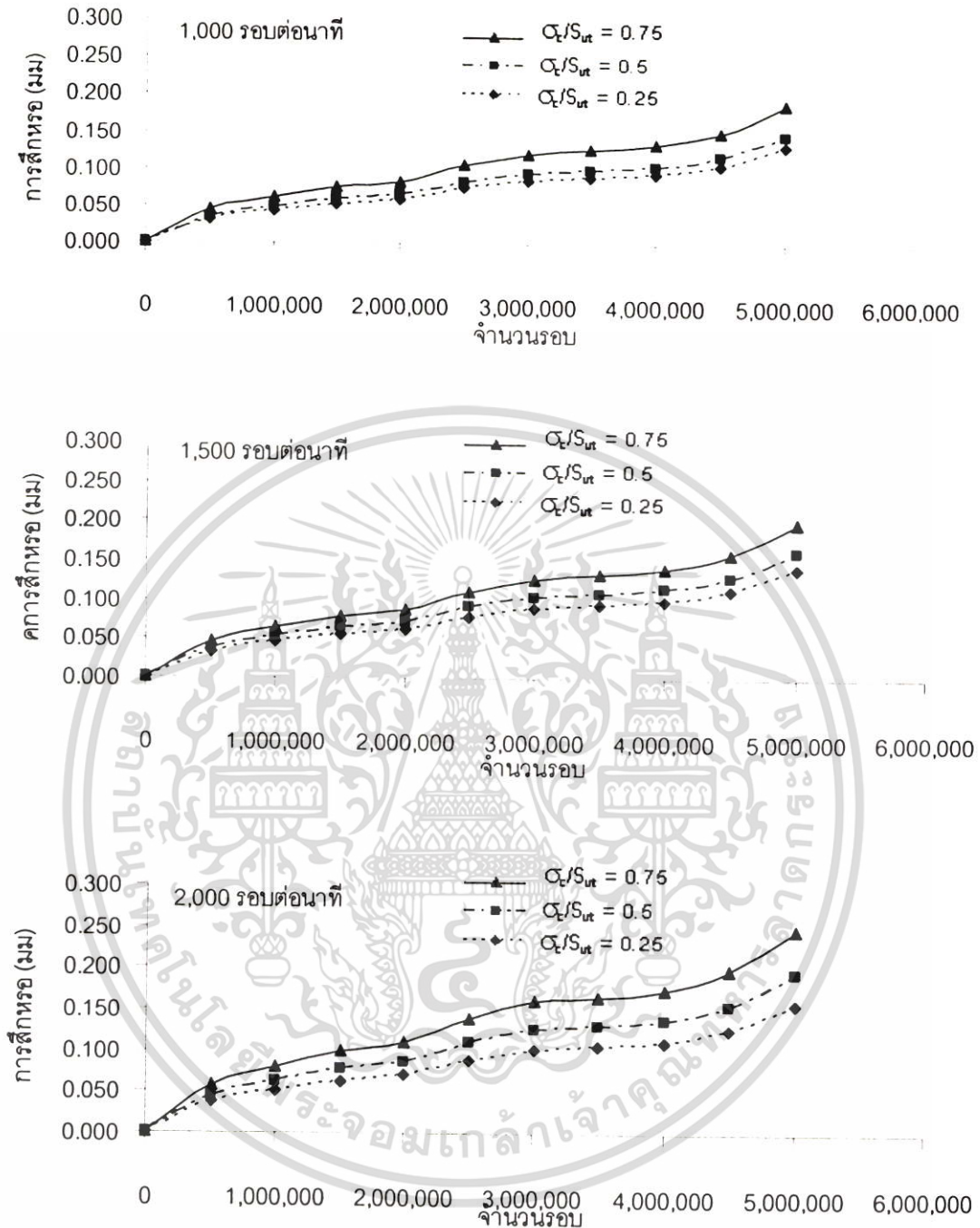
รูปที่ 5.37 กราฟแสดงผลของอัตราส่วนความเค้นต่อการสึกหรอของโพลีเอไมด์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.38 กราฟแสดงผลของความเร็วยุบต่อการลึกลงของเหล็กหล่อเบอร์ 30

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.39 กราฟแสดงผลของอัตราส่วนความเค้นต่อการสึกหรอของเกลียวล้อเบอร์ 30

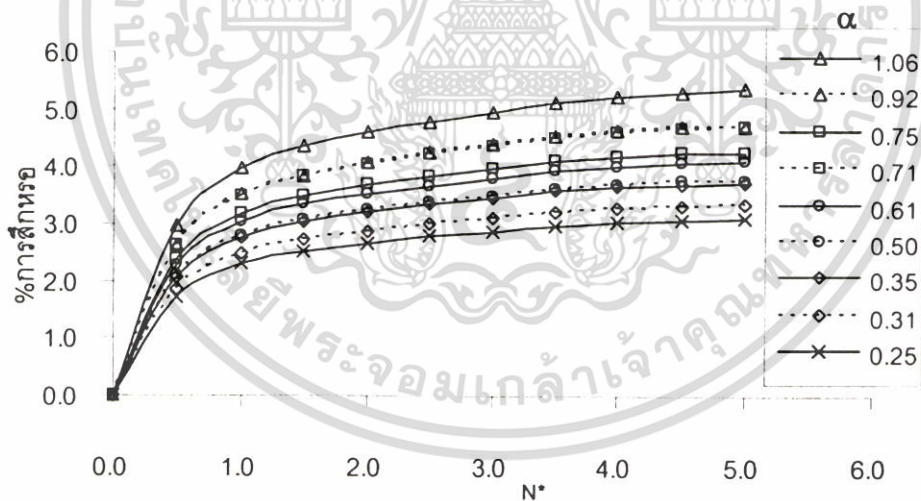
เมื่อพิจารณารูปที่ 5.34 ถึง 5.39 พบว่าเมื่อความเร็วรอบและอัตราส่วนความเค้นเพิ่มขึ้น การสึกหรอของเฟืองโพลีเอทิลีน โพลีเอไมด์และเกลียวล้อเบอร์ 30 จะเพิ่มขึ้นซึ่งเป็นผลมาจากลักษณะการเคลื่อนที่แบบถู (Sliding) ที่สูงขึ้น โดยที่อัตราส่วนความเค้นมีผลทำให้การสึกหรอเพิ่มขึ้นมากกว่าความเร็วรอบ รูปแบบของการสึกหรอของโพลีเอไมด์มีลักษณะเพิ่มขึ้นรวดเร็วใน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

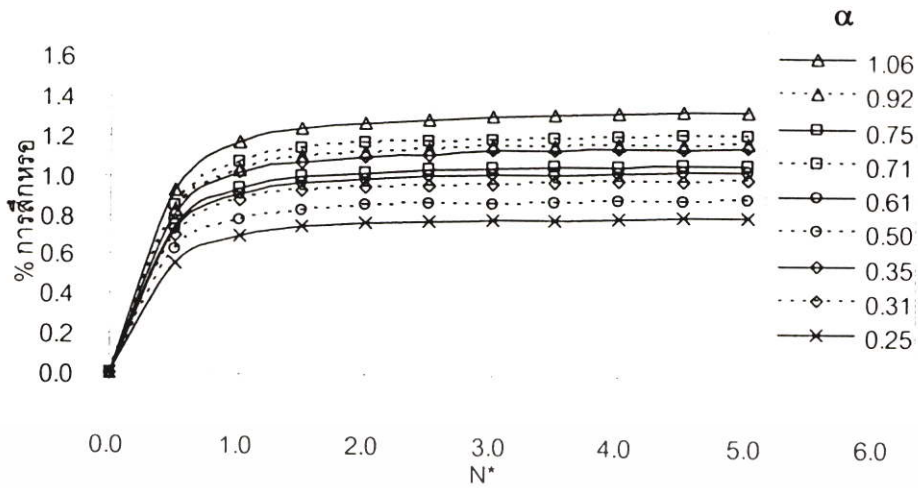
ช่วงแรกๆ ประมาณ 1 ล้านรอบของการทดสอบจากนั้นอัตราการสึกหรอจะเพิ่มขึ้นอย่างช้าๆ ในขณะที่รูปแบบของการสึกหรอของโพลีเอทิลีนมีลักษณะเพิ่มขึ้นรวดเร็วในช่วงแรกๆ ประมาณ 5 แสน ถึง 1 ล้านรอบของการทดสอบจากนั้นอัตราการสึกหรอจะเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง ซึ่งอาจจัดเป็นการสึกหรอแบบไม่รุนแรง (Mild wear) ส่วนรูปแบบของการสึกหรอของเหล็กหล่อเบอร์ 30 มีลักษณะเพิ่มขึ้นรวดเร็วในช่วงแรกๆ ประมาณ 5 แสน ถึง 1 ล้านรอบของการทดสอบและมีลักษณะการเพิ่มขึ้นและช้าลงเป็นช่วงๆ จากนั้นอัตราการสึกหรอจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วและต่อเนื่อง การสึกหรอของเฟืองเหล็กหล่อเบอร์ 30 จะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วหลังจากใช้งานประมาณ 4 ล้านรอบ นั่นคือ รูปแบบการสึกหรอของเฟืองเหล็กหล่อเบอร์ 30 มีลักษณะเป็นแบบไม่รุนแรง (Mild wear) ในช่วงแรก จากนั้นรูปแบบการสึกหรอจะเปลี่ยนไปเป็นแบบรุนแรง (Severe wear)

## 5.6 การสึกหรอของเฟืองตรงในรูป $\alpha$ และ $N^*$

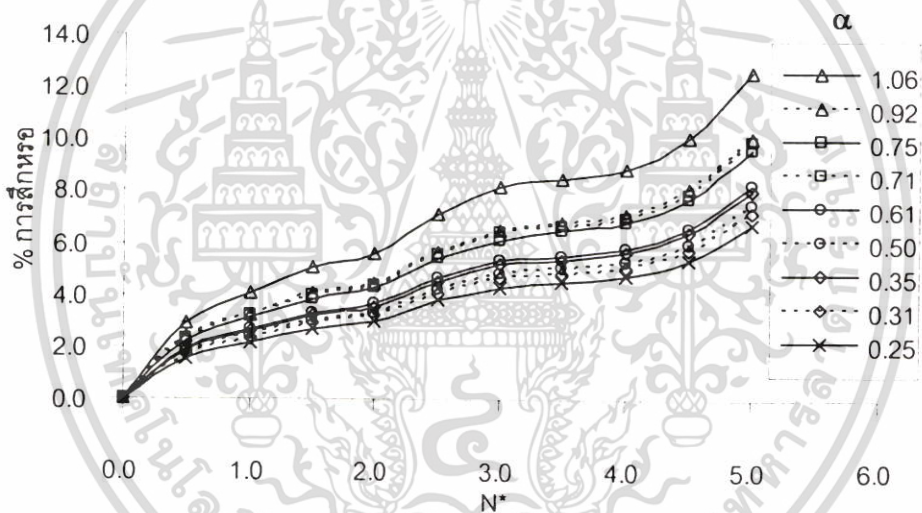
เมื่อนำข้อมูลที่ได้จากการทดสอบการสึกหรอในตารางที่ ข.28 ถึง ข.30 ในภาคผนวก ข มาพลอตจะได้กราฟแสดงการสึกหรอของเฟืองตรงในรูปตัวแปร  $\alpha$  และ  $N^*$  ดังรูปที่ 5.40 ถึง 5.42



รูปที่ 5.40 กราฟแสดงเปอร์เซ็นต์การสึกหรอของโพลีเอทิลีนในรูปตัวแปร  $\alpha$  และ  $N^*$



รูปที่ 5.41 กราฟแสดงเปอร์เซ็นต์การศึกษารวมของโพลีเอไมด์ในรูปแบบตัวแปร  $\alpha$  และ  $N^*$

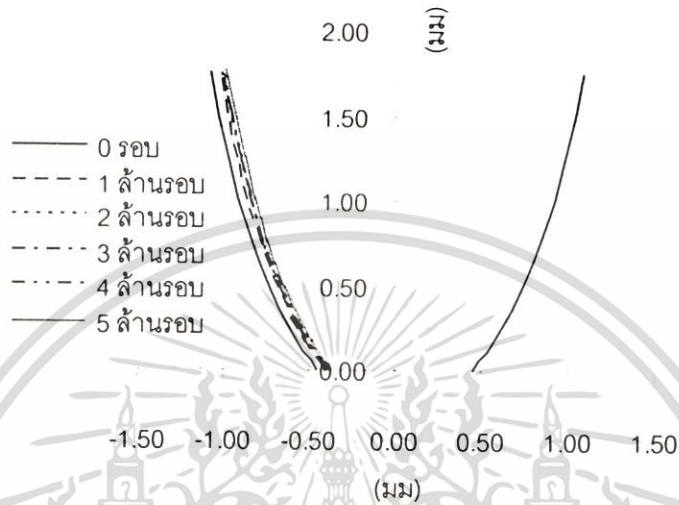


รูปที่ 5.42 กราฟแสดงเปอร์เซ็นต์การศึกษารวมของเกลียวล่อเบอร์ 30 ในรูปแบบตัวแปร  $\alpha$  และ  $N^*$

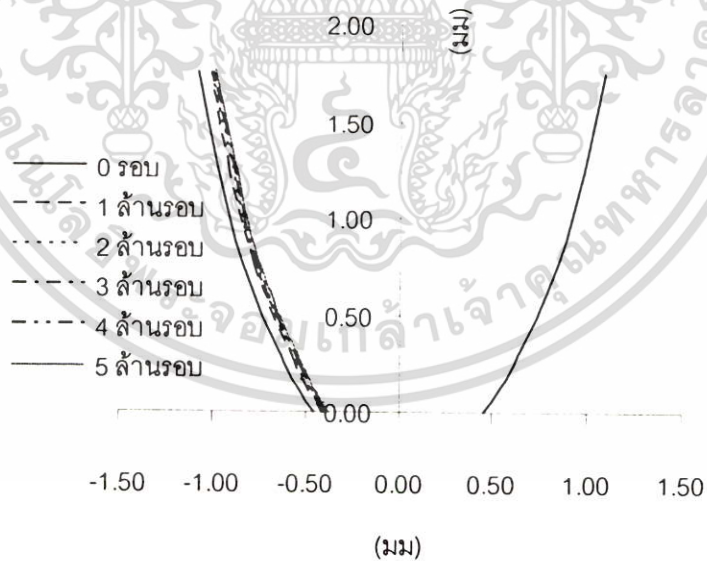
จากรูปที่ 5.40 ถึง 5.42 เมื่อเปรียบเทียบระหว่างเฟืองทั้ง 3 ชนิดพบว่าเปอร์เซ็นต์การศึกษารวมของเฟืองโพลีเอไมด์ต่ำที่สุดคือประมาณ 1.3 เปอร์เซ็นต์ และเปอร์เซ็นต์การศึกษารวมของเฟืองเกลียวล่อเบอร์ 30 สูงที่สุดคือประมาณ 13 เปอร์เซ็นต์ และเฟืองอ็อกซิเมทิลีนมีเปอร์เซ็นต์การศึกษารวมประมาณ 5.5 เปอร์เซ็นต์

## 5.7 โปรไฟล์การสึกหรอของเฟืองตรง

รูปที่ 5.43 ถึง 5.51 แสดงโปรไฟล์การสึกหรอของเฟืองที่ตำแหน่งต่างๆของวัสดุแต่ละชนิด ซึ่งได้จากการวัดโดยใช้เครื่อง CMM

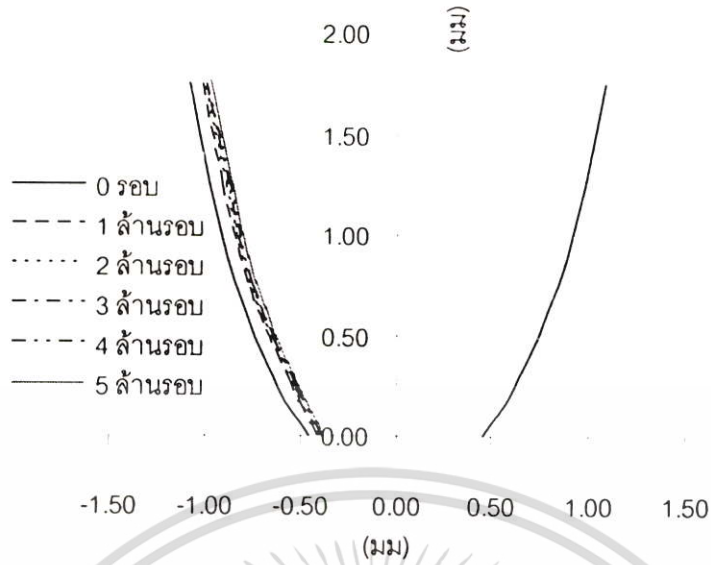


รูปที่ 5.43 การสึกหรอของโปรไฟล์เฟืองโพลีเอทิลีน SR = 0.75 , 1,000 รอบต่อนาที

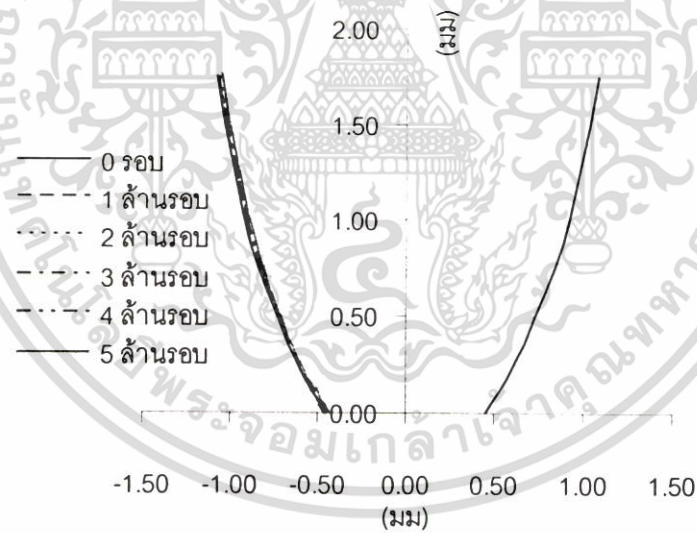


รูปที่ 5.44 การสึกหรอของโปรไฟล์เฟืองโพลีเอทิลีน SR = 0.75 , 1,500 รอบต่อนาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

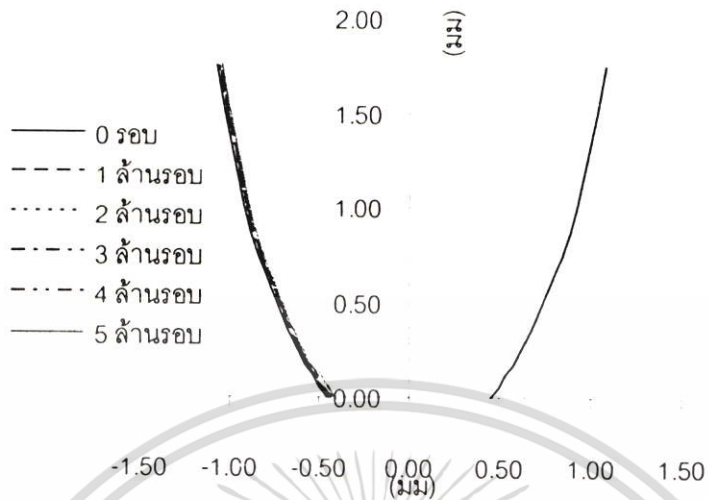


รูปที่ 5.45 การศึกษาของโปรไฟล์เฟืองโพลีอ็อกซิเมทีลีน SR = 0.75 , 2,000 รอบต่อนาที

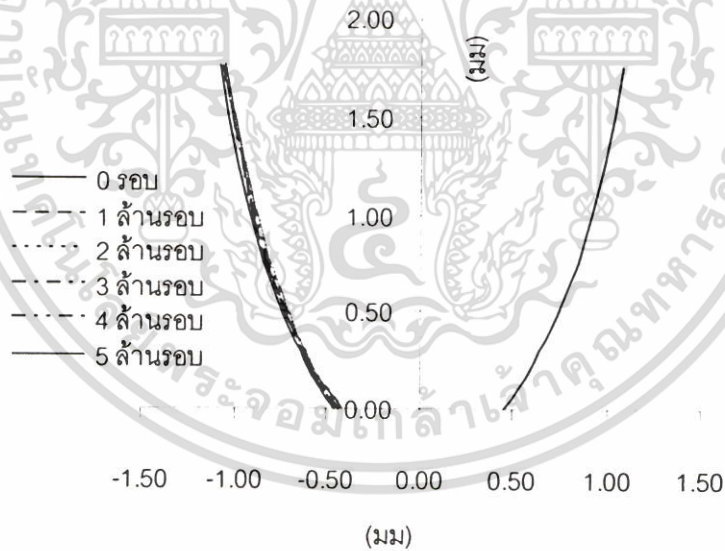


รูปที่ 5.46 การศึกษาของโปรไฟล์เฟืองโพลีเอไมด์ SR = 0.75 , 1,000 รอบต่อนาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

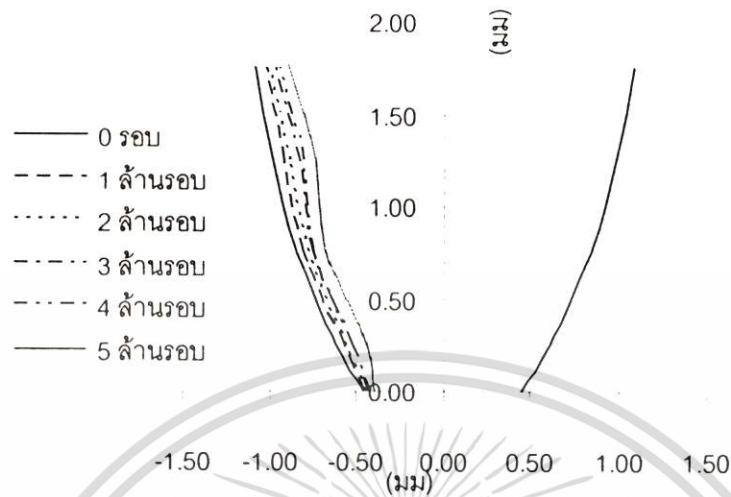


รูปที่ 5.47 การศึกษาของโปรไฟล์เฟืองโพลีเอไมด์ SR = 0.75 , 1,500 รอบต่อนาที

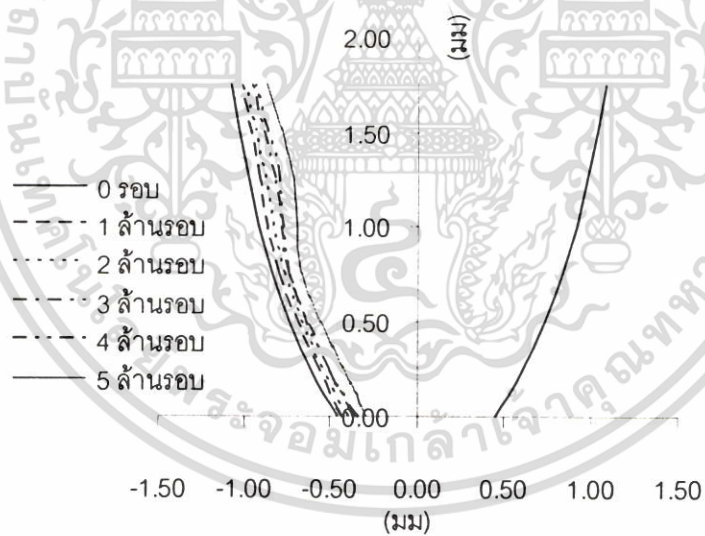


รูปที่ 5.48 การศึกษาของโปรไฟล์เฟืองโพลีเอไมด์ SR = 0.75 , 2,000 รอบต่อนาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

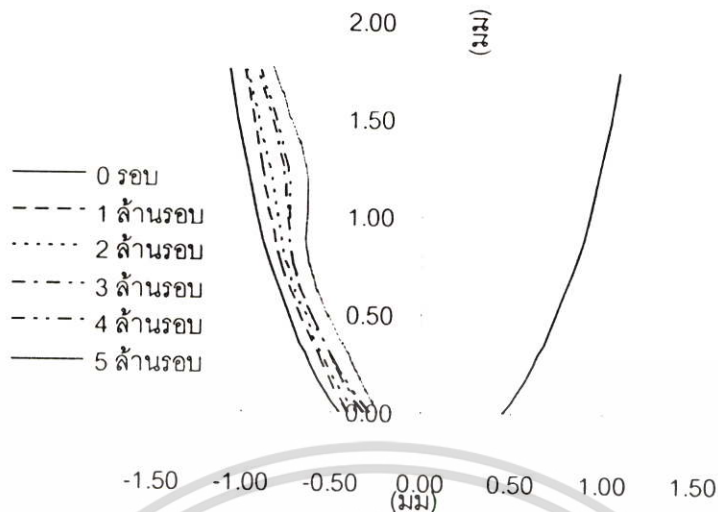


รูปที่ 5.49 การศึกษาของโปรไฟล์เฟืองเหล็กหล่อเบอร์ 30 SR = 0.75 , 1,000 รอบต่อนาที



รูปที่ 5.50 การศึกษาของโปรไฟล์เฟืองเหล็กหล่อเบอร์ 30 SR = 0.75 , 1,500 รอบต่อนาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.51 การสึกหรอของโปรไฟล์เฟืองเกลียวเบอร์ 30 SR = 0.75 , 2,000 รอบต่ออนาทิ

เมื่อพิจารณารูปที่ 5.43 ถึง 5.45 พบว่าโปรไฟล์เฟืองโพลีเอทิลีนเกิดการสึกหรอมากจนถึงประมาณ 1 ล้านรอบและมีการสึกหรอค่อนข้างสม่ำเสมอทั่วทั้งฟัน จากนั้นการสึกหรอจะเกิดข้างแบบไม่สม่ำเสมอทั่วทั้งฟันเมื่อเมื่อความเร็วรอบสูงขึ้นจะเกิดการสึกหรอที่บริเวณ Flank มากขึ้น ส่วนการสึกหรอของโปรไฟล์เฟืองโพลีเอไมด์ในรูปที่ 5.46 ถึง 5.48 พบว่าการสึกหรอจะเกิดมากในช่วงแรกและค่อนข้างสม่ำเสมอทั่วทั้งฟันจากนั้นจะเกิดข้าง และเมื่อความเร็วรอบสูงขึ้นจะเกิดการสึกหรอบริเวณ Face มากขึ้น ส่วนการสึกหรอของโปรไฟล์เฟืองเบอร์ 30 ในรูปที่ 5.49 ถึง 5.51 พบว่าการสึกหรอเกิดขึ้นมากในช่วงแรกและไม่สม่ำเสมอทั้งฟันแต่จะเกิดทั้งบริเวณ Face และ Flank จากนั้นการสึกหรอจะเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องทั้ง 2 บริเวณ เมื่อความเร็วรอบสูงขึ้นจะเกิดการสึกหรอบริเวณ Face มากกว่าบริเวณ Flank

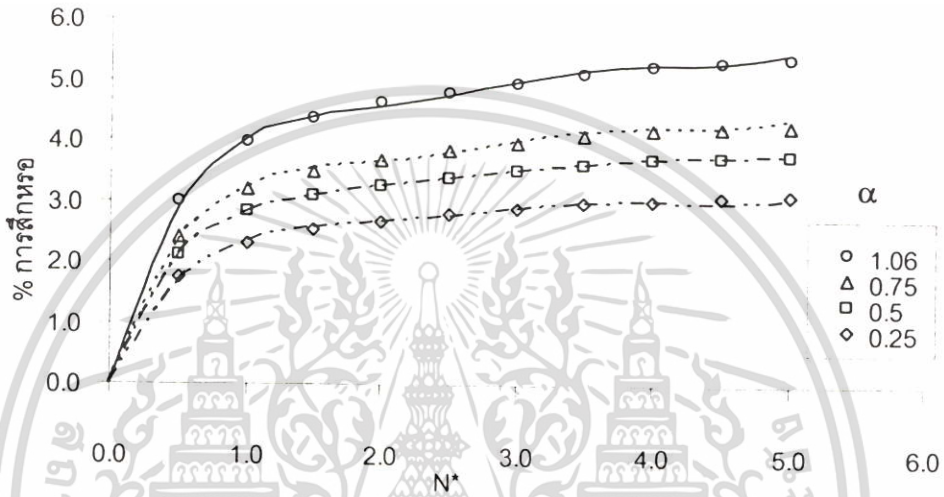
## 5.8 โมเดลการสึกหรอของเฟืองตรง

ในการศึกษานี้หาสมการซึ่งแสดงการสึกหรอของเฟืองโพลีเอทิลีน โพลีเอไมด์และเหล็กหล่อเบอร์ 30 โดยวิธีถดถอยกำลังสองน้อยที่สุด (Least square regression) พิตข้อมูลการสึกหรอในรูปตัวแปร  $\alpha$  และ  $N^*$  ในภาคผนวก ข ตารางที่ ข.28 ถึง ข.30 พบว่าการใช้สมการโพลิโนเมียลกำลัง 5 สามารถพิตข้อมูลได้ดี รูปสมการที่ได้คือ

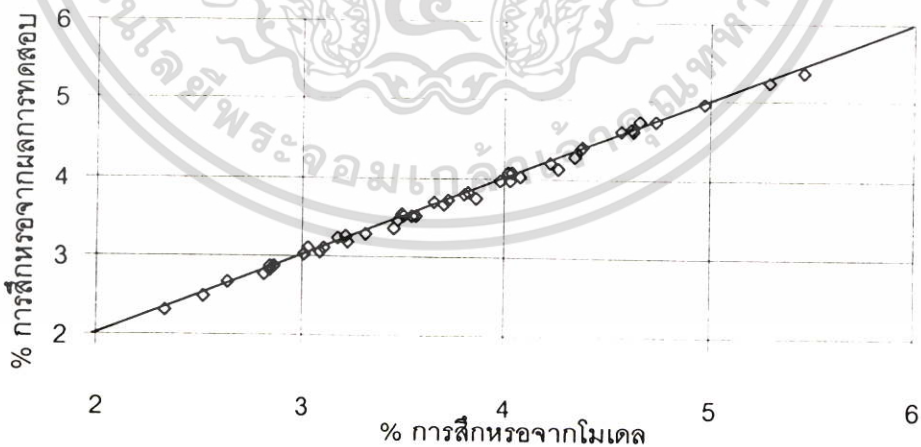
$$D = aN^{*5} + bN^{*4} + cN^{*3} + dN^{*2} + eN^{*} + f$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่ a, b, c, d, e, f คือค่าสัมประสิทธิ์ของสมการซึ่งได้สรุปไว้ในในภาคผนวก ค ตารางที่ค.1 ถึง ค.3 และเมื่อทำการตรวจสอบโมเดลโดยการพลอตเปรียบเทียบค่าความลึกของการสึกหรอที่ได้จากการคำนวณโดยใช้สมการโมเดลการสึกหรอของแต่ละวัสดุเปรียบเทียบกับจุดข้อมูลการสึกหรอที่ได้จากการทดสอบ พบว่าสมการการสึกหรอที่ได้สามารถทำนายการสึกหรอได้ค่อนข้างใกล้เคียงกับข้อมูลการสึกหรอที่ได้จากการทดสอบดังรูปที่ 5.52 ถึง 5.57 โดยมีค่า  $R^2$  ของโพลีอ็อกซิเมทิลีน โพลีเอไมด์และเหล็กหล่อเบอร์ 30 เท่ากับ 99.57 96.58 และ 99.72 ตามลำดับ

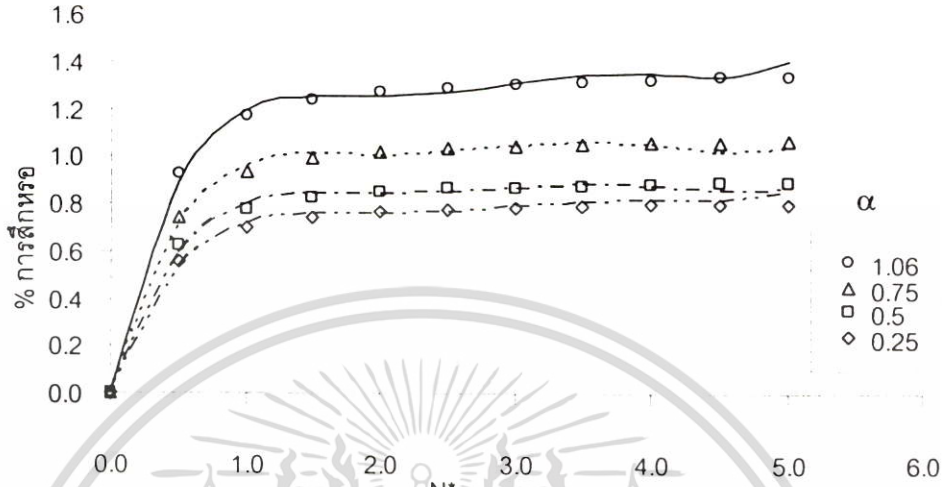


รูปที่ 5.52 เปรียบเทียบเส้นกราฟโมเดลการสึกหรอและผลการทดสอบของเฟืองโพลีอ็อกซิเมทิลีน

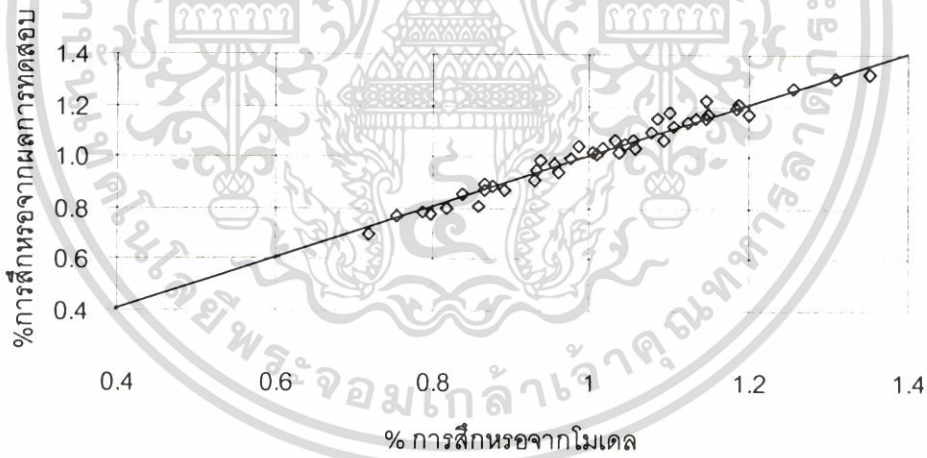


รูปที่ 5.53 เปรียบเทียบค่าเปอร์เซ็นต์การสึกหรอจากโมเดลและผลการทดสอบของเฟืองโพลีอ็อกซิเมทิลีน ( $R^2 = 99.57$ )

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

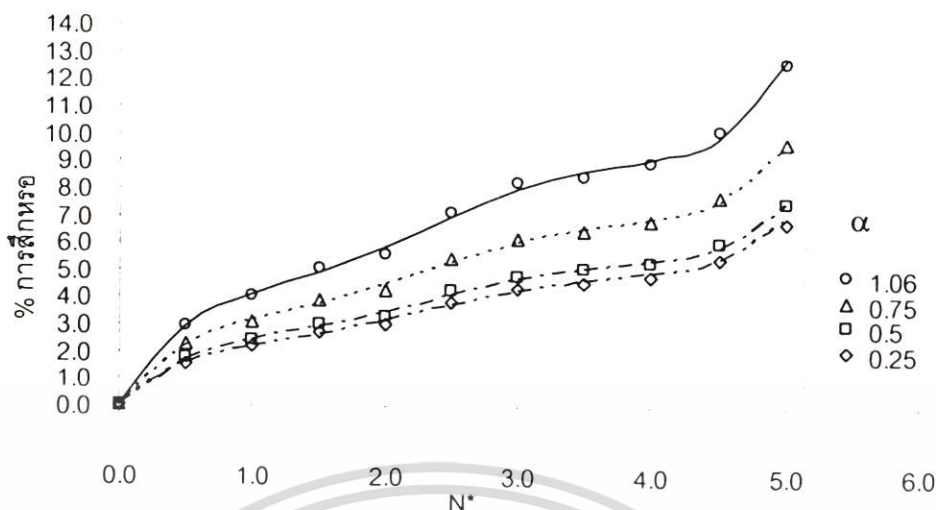


รูปที่ 5.54 เปรียบเทียบเส้นกราฟโมเดลการศึกษหรือและผลการทดสอบของเฟืองโพลีเอไมด์

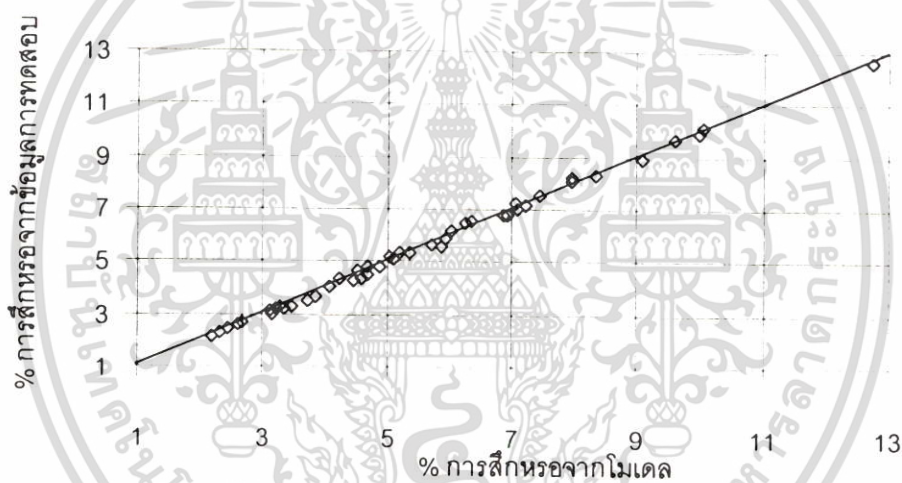


รูปที่ 5.55 เปรียบเทียบค่าเปอร์เซ็นต์การศึกษหรือจากโมเดลและผลการทดสอบของเฟืองโพลีเอไมด์ ( $R^2 = 96.58$ )

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



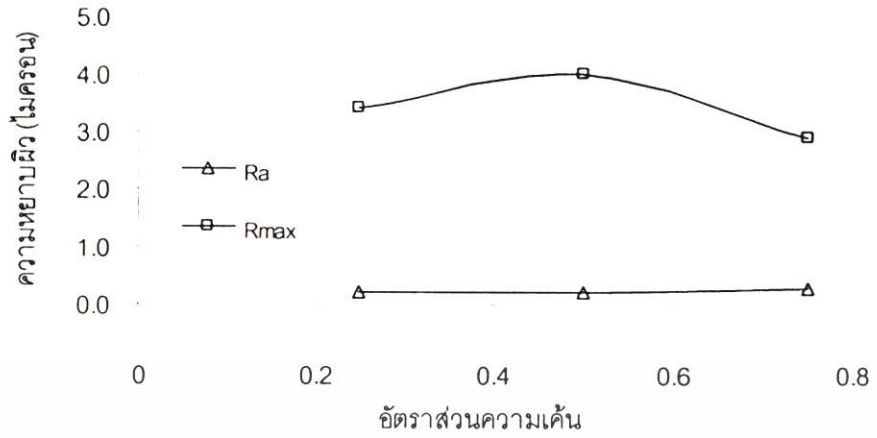
รูปที่ 5.56 เปรียบเทียบเส้นกราฟโมเดลการศึกษารอบและผลการทดสอบของเฟืองเหล็กหล่อเบอร์30



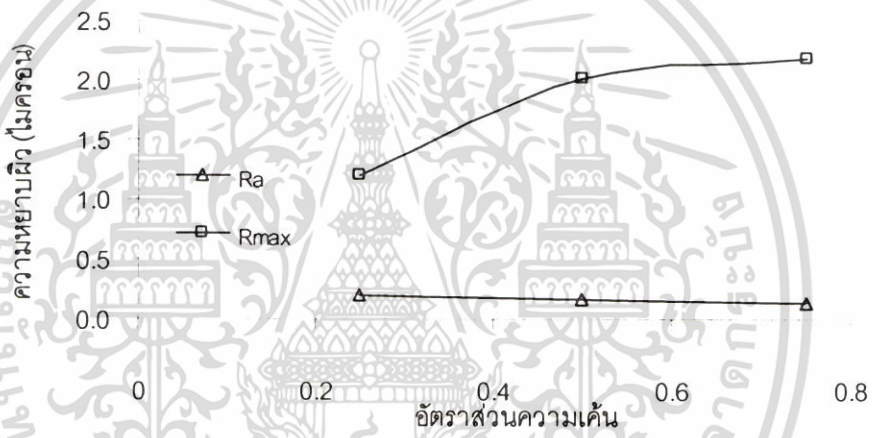
รูปที่ 5.57 เปรียบเทียบค่าเปอร์เซ็นต์การศึกษารอบจากโมเดลและผลการทดสอบของเฟืองเหล็กหล่อเบอร์30 ( $R^2 = 99.72$ )

## 5.9 ความหยาบผิวของเฟืองตรง

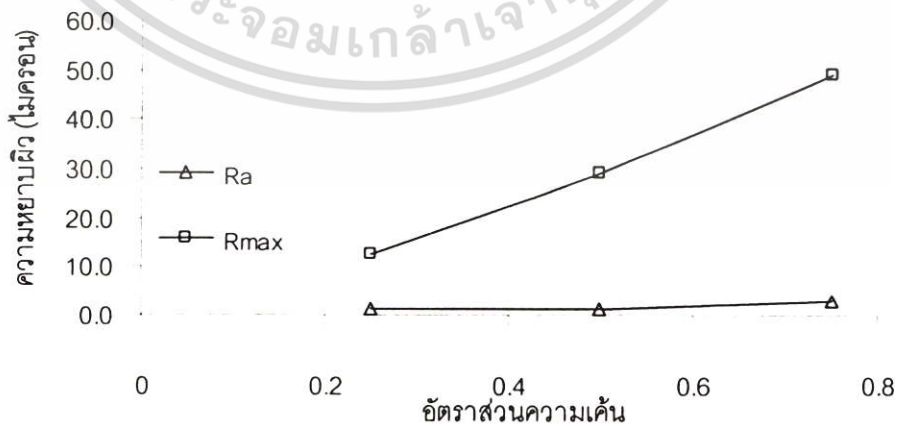
ในการศึกษานี้ทำการวัดความหยาบผิวของเฟืองโพลีเอทิลีน โพลีเอไมด์และเหล็กหล่อเบอร์30 ก่อนการทดสอบและหลังทดสอบครบ 5 ล้านรอบที่อัตราส่วนความเค้นต่างๆ ดังรูปที่ 5.58 ถึง 5.60 ผลการวัดความหยาบผิวได้สรุปไว้ในภาคผนวก ง ตาราง ง.1 ถึง ง.3



รูปที่ 5.58 ความหยาบผิวของโพลีเอทิลีนที่อัตราส่วนความเค้นต่างๆ



รูปที่ 5.59 ความหยาบผิวของโพลีเอไมด์ที่อัตราส่วนความเค้นต่างๆ



รูปที่ 5.60 ความหยาบผิวของเหล็กหล่อเบอร์ 30 ที่อัตราส่วนความเค้นต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

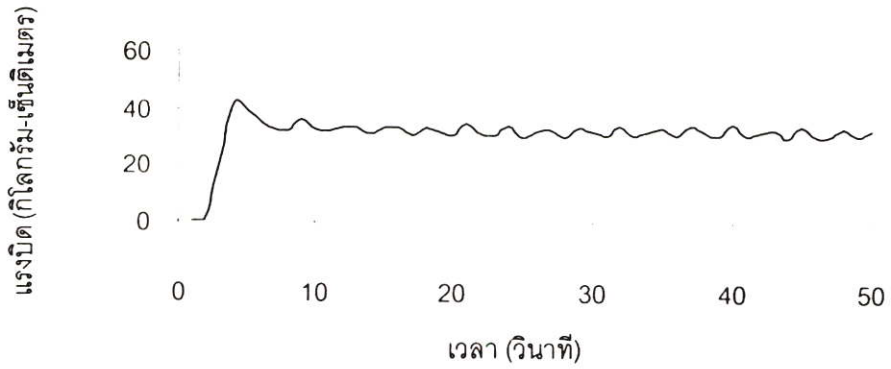
จากรูปที่ 5.58 ถึง 5.60 พบว่าความหยาบผิวแบบ Ra และ Rmax ซึ่งมีนิยามตามมาตรฐาน JIS B0601 ตอนเริ่มต้นของวัสดุทั้ง 3 ชนิดใกล้เคียงกันคือ 0.2 – 0.33 ไมครอน และ 3.78 – 4.5 ไมครอนตามลำดับ หลังการทดสอบครบ 5 ล้ารอบพบว่าเมื่ออัตราส่วนความเค้นเพิ่มขึ้น ความหยาบผิว Ra ของโพลีเอทิลีนและเหล็กหล่อเบอร์ 30 มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นในขณะที่ความหยาบผิว Ra ของโพลีเอไมด์มีแนวโน้มลดลง ซึ่งสอดคล้องกับการสึกหรอของโพลีเอทิลีนและเหล็กหล่อเบอร์ 30 ซึ่งเกิดสูงกว่าโพลีเอไมด์

## 5.10 สัมประสิทธิ์ความเสียหาย

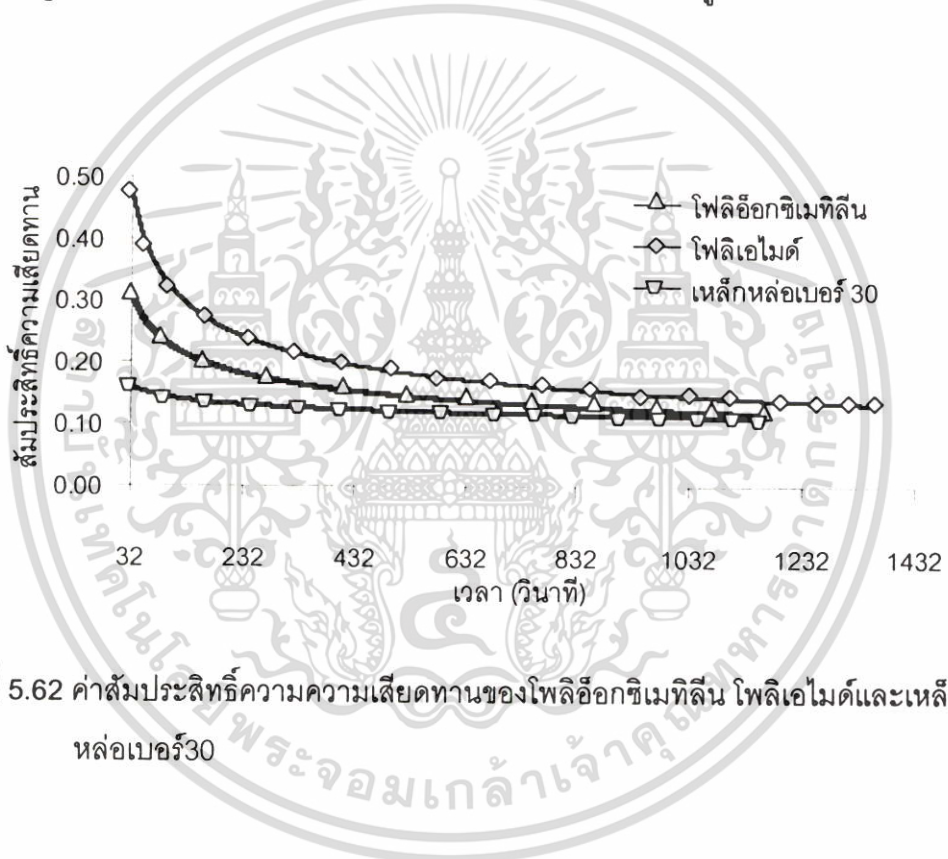
ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียหายของโพลีเอทิลีน โพลีเอไมด์ และเหล็กหล่อเบอร์ 30 ในการศึกษานี้ได้จากการทดลองแบบ pin on disc ของวัสดุทั้ง 3 ชนิด แรงบิดเนื่องจากความเสียหายในตลับลูกปืนของเครื่องทดสอบเป็นดังรูปที่ 5.61 และแรงบิดเพื่อเอาชนะความเสียหายของวัสดุทั้ง 3 ชนิดถูกนำมาใช้ในการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์ความเสียหายโดยใช้สมการ (4.1) ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียหายของวัสดุทั้ง 3 ชนิดเป็นดังรูปที่ 5.62 พบว่าค่าสัมประสิทธิ์ความเสียหายสถิตย์ของโพลีเอทิลีน โพลีเอไมด์ และเหล็กหล่อเบอร์ 30 โดยเฉลี่ยเท่ากับ 0.31, 0.47 และ 0.16 ตามลำดับและสัมประสิทธิ์ความเสียหายจลน์ โดยเฉลี่ยเท่ากับ 0.12, 0.13 และ 0.11 ตามลำดับ

### ตารางที่ 5.7 ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียหาย

วัสดุ	มวล (Kg)	ระยะ L (cm)	แรงบิดเริ่มต้น (kg-cm)	แรงบิดคงที่ (kg-cm)	สัมประสิทธิ์ความเสียหายสถิตย์	สัมประสิทธิ์ความเสียหายจลน์
โพลีเอทิลีน	0.6421	2	42.1	32.8	0.31	0.12
โพลีเอไมด์	0.6421	2	42.3	33.44	0.47	0.13
เหล็กหล่อเบอร์ 30	0.6439	2	41.9	31.8	0.16	0.11



รูปที่ 5.61 แรงบิดเนื่องจากความความเสียดทานของตลับลูกปืนเครื่องทดสอบ



รูปที่ 5.62 ค่าสัมประสิทธิ์ความความเสียดทานของโพลีเมทิลเมทิลีน โพลีเอไมด์และเหล็กหล่อเบอร์ 30

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 6

# สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

### 6.1 สรุปผลการวิจัย

จากการศึกษาคุณลักษณะด้านการสึกหรอของเฟืองตรงขนาดเล็กที่ทำจากวัสดุ โพลีเอไมด์ โพลีออกซิเมทิลีน และเหล็กหล่อเบอร์ 30 ในสภาวะไร้อากาศหล่อขึ้น โดยศึกษาผลกระทบของแรงบิด ความเร็วรอบ และอายุการใช้งานที่มีผลต่อการสึกหรอของเฟืองตรงขนาดเล็กพบว่า พบว่าการสึกหรอของเฟืองโพลีออกซิเมทิลีนและเฟืองโพลีเอไมด์เกิดขึ้นค่อนข้างสม่ำเสมอทั่วทั้งหน้าฟัน ส่วนการสึกหรอของเฟืองเหล็กหล่อเบอร์ 30 จะไม่สม่ำเสมอทั่วทั้งหน้าฟันแต่จะเกิดการสึกหรอมากบริเวณ Flank ที่ใกล้กับจุดพิช และมีลักษณะการสึกหรอรุนแรง (Severe wear)

รูปแบบการสึกหรอของเฟืองโพลีออกซิเมทิลีนและเฟืองโพลีเอไมด์มีลักษณะเพิ่มขึ้นรวดเร็วในช่วงแรกๆ ของการใช้งานประมาณ 1 ล้านรอบจากนั้นการสึกหรอจะเพิ่มขึ้นอย่างช้าๆ ซึ่งอาจจัดเป็นการสึกหรอแบบไม่รุนแรง (Mild wear) ในขณะที่การสึกหรอของเฟืองเหล็กหล่อเบอร์ 30 เกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องและในอัตราที่สูง การสึกหรอของเฟืองเหล็กหล่อเบอร์ 30 จะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วหลังจากใช้งานประมาณ 4 ล้านรอบ นั่นคือ รูปแบบการสึกหรอของเฟืองเหล็กหล่อเบอร์ 30 มีลักษณะเป็นแบบไม่รุนแรง (Mild wear) ในช่วงแรก จากนั้นรูปแบบการสึกหรอจะเปลี่ยนไปเป็นแบบรุนแรง (Severe wear)

เมื่อความเร็วรอบเพิ่มขึ้นการสึกหรอจะเพิ่มสูงขึ้นในวัสดุทั้ง 3 ชนิด ซึ่งเป็นผลมาจากลักษณะการเคลื่อนที่แบบถู (Sliding) ที่สูงขึ้น และเมื่ออัตราส่วนความเค้นหรือภาระเพิ่มขึ้นการสึกหรอจะเพิ่มขึ้นในวัสดุทั้ง 3 ชนิด ซึ่งสอดคล้องกับสมการการสึกหรอของ Archard จากการวิจัยนี้พบว่าวัสดุทั้ง 3 ชนิดมีการสึกหรอเนื่องจากอัตราส่วนความเค้นหรือภาระสูงกว่าการสึกหรอเนื่องจากความเร็วรอบ

เมื่อเปรียบเทียบระหว่างวัสดุกลุ่มโพลีเมอร์คือโพลีออกซิเมทิลีนและโพลีเอไมด์ พบว่าเฟืองโพลีเอไมด์มีคุณสมบัติด้านการสึกหรอดีกว่าเฟืองโพลีออกซิเมทิลีน คือสึกหรอเพียง 1.3 เปอร์เซ็นต์ ในขณะที่เฟืองโพลีออกซิเมทิลีนมีการสึกหรอ 5.5 เปอร์เซ็นต์ นั่นคือเฟืองโพลีเอไมด์สึกหรอน้อยกว่าประมาณ 4 เท่า และเมื่อเปรียบเทียบระหว่างวัสดุ 3 ชนิดนี้พบว่าเฟืองโพลีเอไมด์มีคุณสมบัติด้านการสึกหรอที่ดีที่สุด และเฟืองเหล็กหล่อเบอร์ 30 มีคุณสมบัติด้านการสึกหรอด้วยที่ดีที่สุด คือประมาณ 13 เปอร์เซ็นต์ นั่นคือสึกหรอมากกว่าเฟืองโพลีเอไมด์ประมาณ 10 เท่า

ในการศึกษานี้พบว่าสมการการสึกหรอของเฟืองโพลีออกซิเมทิลีน เฟืองโพลีเอไมด์และเฟืองเหล็กหล่อเบอร์ 30 สามารถแทนได้ด้วยสมการโพลีโนเมียลกำลัง 5 โดยมีรูปสมการเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$D = aN^5 + bN^4 + cN^3 + dN^2 + eN + f$$

เมื่อ  $D$  คือ เปอร์เซ็นต์ความลึกของการสึกหรอเป็นมิลลิเมตรเมื่อเทียบกับความหนาพื้นที่จุดพิช และ  $N$  คือจำนวนรอบของการหมุนมีหน่วยเป็นล้านรอบ ค่าสัมประสิทธิ์  $a, b, c, d, e, f$  ของเฟืองโพลีเอทิลีน เฟืองโพลีเอไมด์และเฟืองเหล็กหล่อเบอร์ 30 สรุปได้สรุปไว้ในภาคผนวก ค ตาราง ค.1 ถึง ค.3

## 6.2 ข้อเสนอแนะ

การศึกษานี้เน้นคุณลักษณะการสึกหรอของเฟืองตรงซึ่งทำจากวัสดุโพลีเอทิลีนและโพลีเอไมด์เป็นสำคัญ ผลการศึกษาการสึกหรอที่ได้จากการทดลองนี้สามารถนำไปใช้เป็นข้อมูลเบื้องต้นในการประมาณการสึกหรอหรือออกแบบใช้งานระบบส่งกำลังขนาดเล็กซึ่งทำจากวัสดุโพลีเอทิลีนและโพลีเอไมด์ซึ่งต้องคำนึงถึงการสึกหรอที่เกิดในสภาวะการใช้งานต่างๆ เพื่อความแม่นยำในการส่งผ่านกำลังและความเร็วรอบ อย่างไรก็ตามเนื่องจากในการศึกษานี้ใช้ตัวอย่างเฟืองพลาสติกในการทดลองที่ได้จากการกัดด้วยมิดกัตเฟืองซึ่งอาจมีความแตกต่างจากเฟืองพลาสติกที่ผลิตด้วยวิธีอื่นๆ เช่น การฉีดในแม่พิมพ์อยู่บ้าง เช่น ความหยาบของผิวของเฟืองที่ได้จากการฉีดในแม่พิมพ์อาจแตกต่างจากเฟืองที่ผลิตโดยการกัดด้วยมิดกัตเฟืองเป็นต้น ดังนั้นการนำผลในการศึกษานี้ไปใช้กับเฟืองพลาสติกที่ผลิตด้วยวิธีการฉีดในแม่พิมพ์อาจมีความคลาดเคลื่อนเนื่องจากปัจจัยดังกล่าวได้

การสึกหรอของฟันเฟืองตรงย่อมส่งผลกระทบต่อระบบส่งกำลังโดยรวม ดังนั้นผลกระทบของการสึกหรอที่มีต่อสมรรถนะ ประสิทธิภาพและความถูกต้องของระบบส่งกำลังเป็นอีกปัญหาหนึ่งที่น่าทำการศึกษาเพิ่มเติม รวมถึงรูปแบบความเสียหายเนื่องจากการสึกหรอและกลไกของการสึกหรอที่แน่ชัดในวัสดุเฟืองแต่ละชนิดยังต้องมีการศึกษาวิจัยในเชิงลึกถึงผลของปัจจัยที่มีความเกี่ยวข้องทั้งในด้านปัจจัยจากการใช้งาน หรือกระบวนการผลิต และปัจจัยด้านคุณสมบัติของตัววัสดุเฟืองเองทั้งด้านมหภาคและจุลภาค ซึ่งปัจจัยต่างๆ เหล่านี้ยังไม่ได้ครอบคลุมไว้ในงานวิจัยนี้ และยังเป็นปมปัญหาที่ต้องการการการศึกษาวิจัยต่อไปซึ่งอาจใช้ข้อมูลการสึกหรอจากการศึกษานี้เป็นพื้นฐานต่อไปได้


## เอกสารอ้างอิง

- [1] J.R. Barber , M. Ciavarella. "Contact mechanics" **International Journal of Solids and Structures**. 2003, Vol.37, pp. 29-43.
- [2] Yan Ding, Neville F. Rieger. "Spalling formation mechanism for gear" **Wear**. 2003, Vol.254, pp. 1307-1317.
- [3] B.R.Höhn, K. Michaelis. "Influence of oil temperature on gear failures" **Tribology International**. 2004, Vol.37, pp. 103-109.
- [4] Masaya Kurokawa, Yoshitaka Uchiyama, Tomoaki Iwai, Susumu Nagai. "Performance of plastic gear made of carbon fiber reinforced polyamide 12" **Wear**. 2003, Vol.254, pp. 468-473.
- [5] Masaya Kurokawa, Yoshitaka Uchiyama, Susumu Nagai. "Performance of plastic gear made of carbon fiber reinforced polyether-ether-ketone" **Tribology International**. 1999, Vol.32, pp. 491-497.
- [6] Robert L. Mott. **Machine Elements in Mechanical Design**. 4<sup>th</sup> ED. New Jersey.: Pearson Prentice Hall. 2004.
- [7] Joseph E. Shigley, Charles R. Mischke. **Corrosion & Wear : a Mechanical Designer's Workbook**. New York.: McGraw Hill. 1989.
- [8] M.B. Peterson, W.O. Winer. **Wear Control Handbook**. U.S.A.: The American Society of Mechanical Engineers. 1980.
- [9] Joseph E. Shigley, Charles R. Mischke. **Mechanical Engineering Design**. 5<sup>th</sup> ED. Singapore: McGraw Hill, 1989.
- [10] Allianz Versicherungs AG. **Allinz Handbook of Loss Prevention**. Munich: VDI-Verlag. 1987.
- [11] ASTM International Handbook Committee. **ASTM Standard Volume 08.01**. Baltimore: ASTM International 2003.
- [12] A.A. Torrance. "A method for calculating boundary friction and wear" **Wear**. 2005, Vol.258, pp. 924-934.
- [13] มานพ ต้นตระกูลบัณฑิต. **วัสดุวิศวกรรม**. พิมพ์ครั้งที่ 9. กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์ สสท. 2545.

- [14] Pat L. Mangonon. **The Principles of Materials Selection for Engineering Design.**  
U.S.A.: Prentice-Hall, Inc. 1999.
- [15] ASTM International Handbook Committee. **ASM Handbook Volume 1.** 10<sup>TH</sup> ED.  
U.S.A.: ASM International. 1990.
- [16] Hamilton H. Mabie, Charles F. Reinholz. **Mechanisms and Dynamics of Machinery.**  
4<sup>th</sup> ED. Singapore: John Wiley & Sons, Inc. 1987.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก ก  
การออกแบบและทวนสอบชุดทดสอบการสีกหรือเฟืองตรง

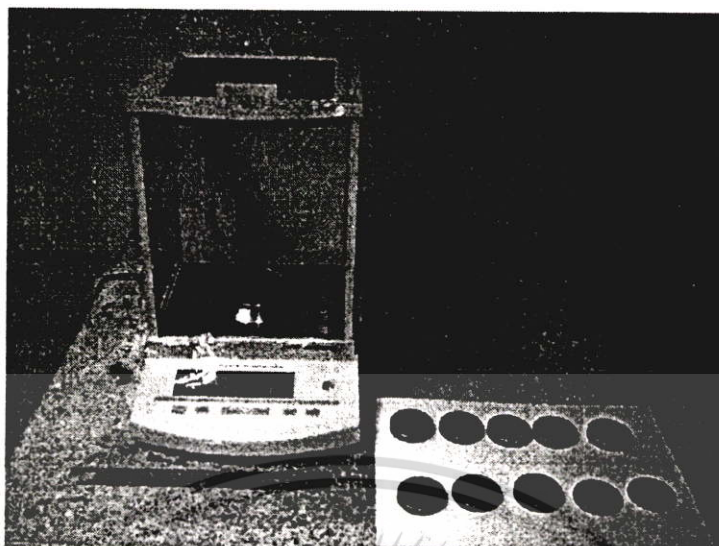
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชุดทดสอบการสึกหรอของเฟืองตรงที่จัดทำขึ้นสามารถใช้ทดสอบการสึกหรอของเฟืองตรงได้ที่ละคู่ มีทั้งหมด 4 ชุดโดยแต่ละชุดประกอบด้วยมอเตอร์กระแสตรงขนาด 60 วัตต์ 28 โวลต์ 2.2 แอมแปร์เป็นตัวขับเคลื่อนซึ่งเป็นวัสดุอลูมิเนียม 7075-T6 ที่มีน้ำหนักเบา มีความแข็งแรงและมีความทนทานต่อความล้าสูง เฟืองมี 2 ชุดคือเฟืองตัวขับเคลื่อนซึ่งต่อกับมอเตอร์โดยใช้ข้อต่ออ่อนและเฟืองตัวถูกขับเคลื่อนซึ่งต่อกับโหลดแรงบิดแบบ Band brake เฟืองทั้ง 2 ชุดจะใช้เสตรนเกจแบบความเครียดเฉือนของ Kyowa รุ่น KFG-2-120-D31-23 ซึ่งเป็นเสตรนเกจที่ใช้กับอลูมิเนียมมีความยาวเกจเท่ากับ 2 มิลลิเมตรความต้านทาน  $120 \pm 0.8$  โอห์มและมีเกจเพคเตอร์  $2.10 \pm 1.0\%$  โดยต่อวงจรแบบ Full bridge การปรับโหลดแรงบิดของชุดทดสอบนี้อาศัยการปรับแรงดึงเชือกของชุด Band brake โดยสามารถประมาณโหลดแรงบิดได้จากค่าความต่างของแรงดึงทั้ง 2 ด้านโดยมีตาชั่งอ่านค่าแรงดึงเชือกได้ การปรับความเร็วรอบของชุดขับเคลื่อนใช้ Regulator ที่สามารถปรับโวลต์ได้ 0 – 30 โวลต์ โดยมีความสามารถรับกระแสสูงสุดได้ 3 แอมแปร์ ตามรูปที่ ก.1

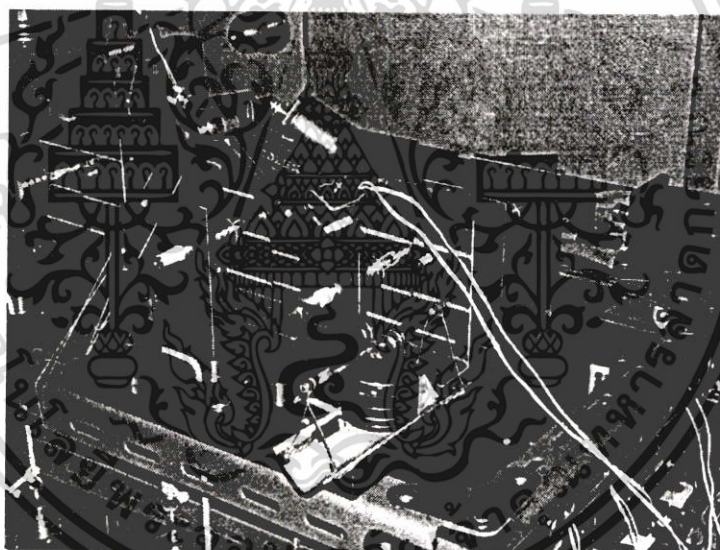


รูปที่ ก.1 เครื่องทดสอบการสึกหรอของเฟืองตรง

การทวนสอบแรงบิดเครื่องทดสอบการสึกหรอของเฟืองตรงใช้หลักการของแรงบิดเนื่องจากน้ำหนักโดยการใช้ตุ้มน้ำหนักที่ผ่านการชั่งโดยเครื่องซึ่งที่มีความละเอียด 0.1 มิลลิกรัมดังรูป ก.2 และใช้ระยะโมเมนต์ (Moment arm) เท่ากับ 61.5 มิลลิเมตรดังรูป ก.3 เอادتัทของเสตรนเกจขณะทำการทวนสอบชุดเฟืองสามารถอ่านค่าได้จากชุดอ่านค่าเสตรน



รูปที่ ก.2 การขังมวลที่ใช้ในการทดสอบแรงบิดของเครื่องทดสอบการสั่นของเฟืองตรง



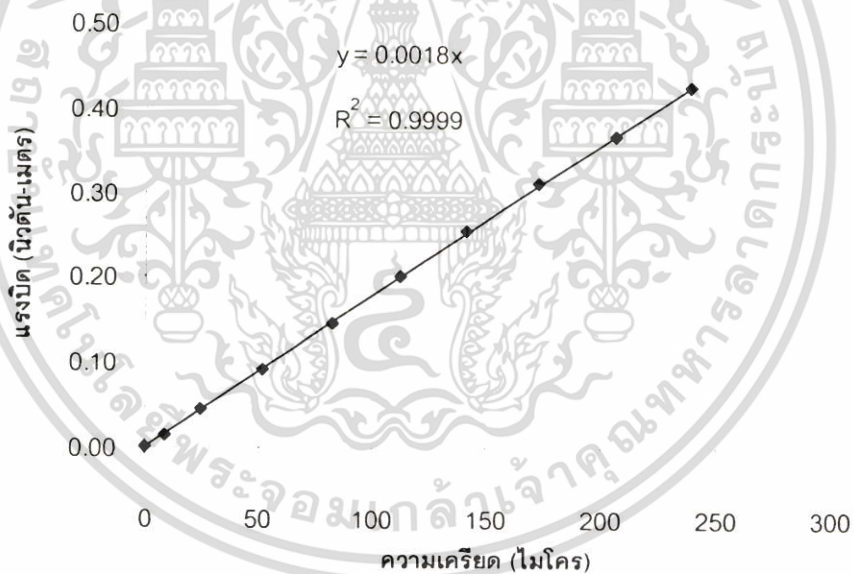
รูปที่ ก.3 การทดสอบแรงบิดของเครื่องทดสอบการสั่นของเฟืองตรง

ข้อมูลการทดสอบและกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดและค่าความเครียดรูปไว้ในตาราง ก.1 ถึง ก.16 และรูปที่ ก.4 ถึง ก.19

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.1 ข้อมูลการทวนสอบแรงบิดเพลลาขับเคลื่อนทดสอบตัวที่ 1 ทิศตามเข็มนาฬิกา

แรงบิด (นิวตันเมตร)	ความเครียดทิศทางตามเข็มนาฬิกา			
	1st	2nd	3rd	ค่าเฉลี่ย
0.0000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
0.0151	0.00890	0.00910	0.00890	0.00897
0.0450	0.02320	0.02350	0.02820	0.02497
0.0920	0.05080	0.05210	0.05180	0.05157
0.1460	0.08230	0.08530	0.07870	0.08210
0.2001	0.11210	0.11320	0.11210	0.11247
0.2548	0.14050	0.14340	0.13890	0.14093
0.3105	0.17010	0.17210	0.17510	0.17243
0.3670	0.21020	0.21300	0.19640	0.20653
0.4247	0.23500	0.24010	0.24020	0.23843

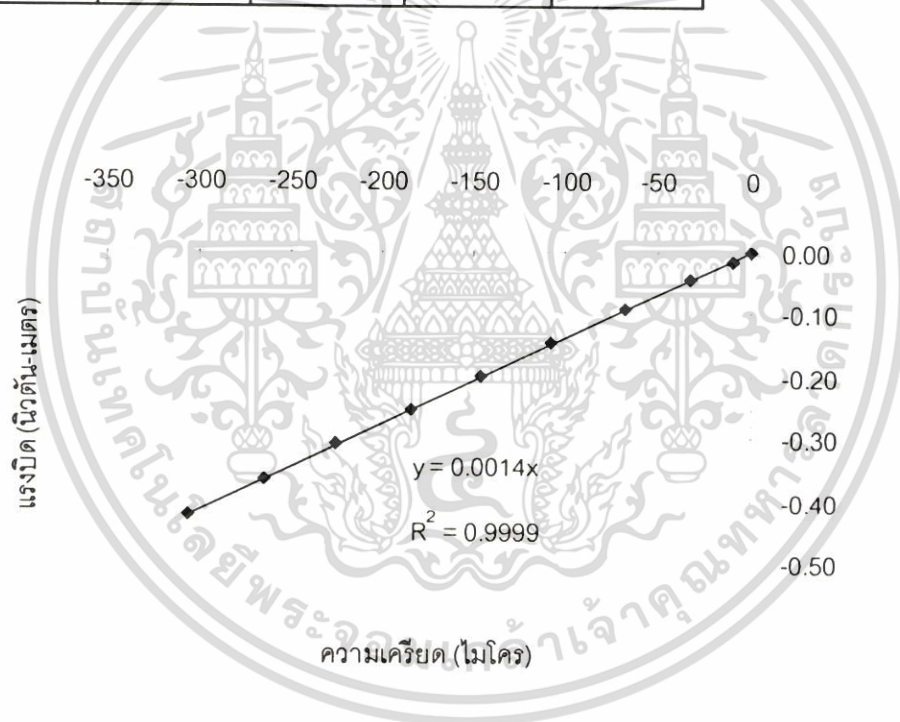


รูปที่ ก.4 กราฟแรงบิดและความเครียดของการทวนสอบแรงบิดเพลลาขับเคลื่อนทดสอบตัวที่ 1 ทิศตามเข็มนาฬิกา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.2 ข้อมูลการทวนสอบแรงบิดเพลลาขับชุดทดสอบตัวที่ 1 ทิศทวนเข็มนาฬิกา

แรงบิด (นิวตันเมตร)	ความเครียดทิศทางทวนเข็มนาฬิกา			
	1st	2nd	3rd	ค่าเฉลี่ย
0.0000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
-0.0151	-0.01140	-0.00950	-0.01000	-0.01030
-0.0450	-0.03550	-0.03040	-0.03050	-0.03213
-0.0920	-0.06550	-0.06890	-0.06870	-0.06770
-0.1460	-0.10760	-0.10790	-0.10790	-0.10780
-0.2001	-0.14400	-0.14480	-0.14840	-0.14573
-0.2548	-0.18350	-0.18200	-0.18600	-0.18383
-0.3105	-0.22480	-0.22480	-0.22690	-0.22550
-0.3670	-0.26300	-0.26330	-0.26700	-0.26443
-0.4247	-0.30500	-0.30520	-0.30600	-0.30540

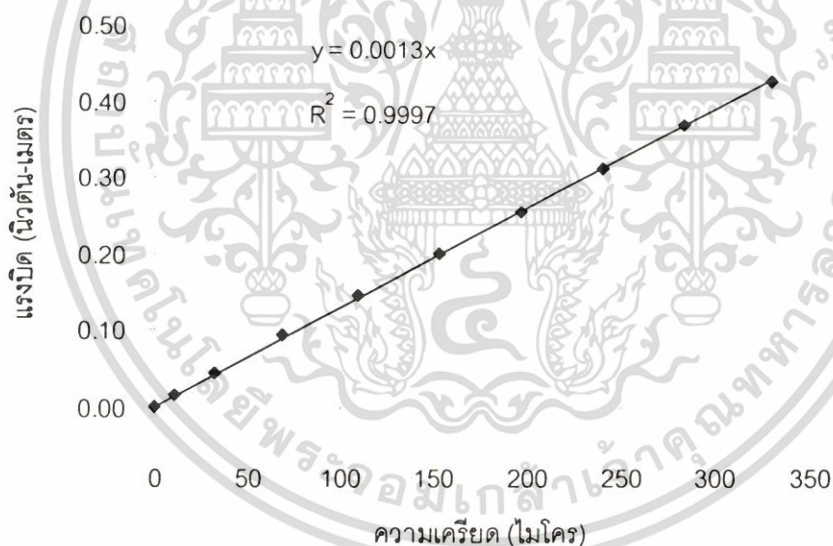


รูปที่ ก.5 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดและค่าความเครียดของการทวนสอบแรงบิดเพลลาขับชุดทดสอบตัวที่ 1 ทิศทวนเข็มนาฬิกา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.3 ข้อมูลการทวนสอบแรงบิดเพลลาถูกซับซ้อนทดสอบตัวที่1 ทิศตามเข็มนาฬิกา

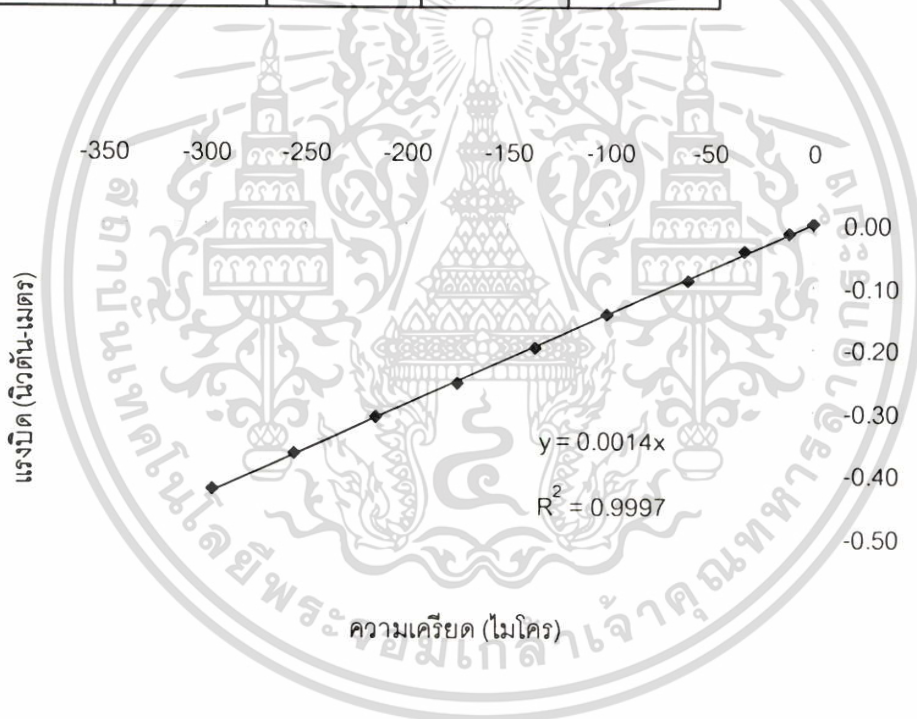
แรงบิด (นิวตันเมตร)	ความเครียดทิศทางตามเข็มนาฬิกา			
	1st	2nd	3rd	ค่าเฉลี่ย
0.0000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
0.0151	0.01180	0.01030	0.00980	0.01063
0.0450	0.03520	0.03190	0.03050	0.03253
0.0920	0.07220	0.06700	0.06480	0.06800
0.1460	0.11480	0.10850	0.10480	0.10937
0.2001	0.15830	0.15300	0.14800	0.15310
0.2548	0.20260	0.19580	0.19150	0.19663
0.3105	0.24780	0.23940	0.23600	0.24107
0.3670	0.29150	0.28140	0.27800	0.28363
0.4247	0.33770	0.32750	0.32360	0.32960



รูปที่ ก.6 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดและค่าความเครียดของการทวนสอบแรงบิดเพลลาถูกซับซ้อนทดสอบตัวที่1 ทิศตามเข็มนาฬิกา

ตารางที่ ก.4 ข้อมูลการทวนสอบแรงบิดเพลากลูกข้อต่อทดสอบตัวที่ 1 ทิศทวนเข็มนาฬิกา

แรงบิด (นิวตันเมตร)	ความเครียดทิศทางทวนเข็มนาฬิกา			
	1st	2nd	3rd	ค่าเฉลี่ย
0.0000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
-0.0151	-0.01150	-0.01190	-0.01200	-0.01180
-0.0450	-0.03260	-0.03400	-0.03420	-0.03360
-0.0920	-0.05880	-0.05600	-0.06950	-0.06143
-0.1460	-0.09900	-0.09300	-0.10850	-0.10017
-0.2001	-0.13030	-0.13090	-0.14750	-0.13623
-0.2548	-0.17650	-0.16920	-0.17640	-0.17403
-0.3105	-0.21500	-0.21650	-0.21250	-0.21467
-0.3670	-0.25780	-0.25720	-0.25080	-0.25527
-0.4247	-0.29120	-0.29900	-0.29600	-0.29540

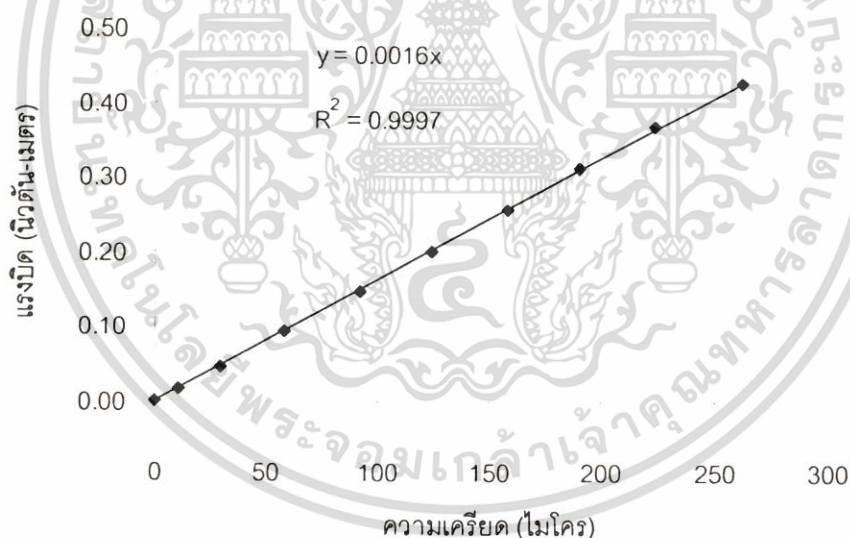


รูปที่ ก.7 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดและค่าความเครียดของการทวนสอบแรงบิดเพลากลูกข้อต่อทดสอบตัวที่ 1 ทิศทวนเข็มนาฬิกา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.5 ข้อมูลการทวนสอบแรงบิดเพลลาขับเคลื่อนทดสอบตัวที่ 2 ทิศตามเข็มนาฬิกา

แรงบิด (นิวตันเมตร)	ความเครียดทิศทางตามเข็มนาฬิกา			
	1st	2nd	3rd	ค่าเฉลี่ย
0.0000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
0.0151	0.00980	0.01200	0.00980	0.01053
0.0450	0.02900	0.03010	0.02840	0.02917
0.0920	0.05570	0.06040	0.05870	0.05827
0.1460	0.08800	0.09490	0.09260	0.09183
0.2001	0.11950	0.12800	0.12600	0.12450
0.2548	0.15550	0.16150	0.15600	0.15767
0.3105	0.18740	0.19150	0.19080	0.18990
0.3670	0.22330	0.22330	0.22430	0.22363
0.4247	0.26300	0.25880	0.26360	0.26180



รูปที่ ก.8 กราฟแรงบิดและความเครียดของการทวนสอบแรงบิดเพลลาขับเคลื่อนทดสอบตัวที่ 2 ทิศตามเข็มนาฬิกา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.6 ข้อมูลการทวนสอบแรงบิดเพลลาขับเคลื่อนทดสอบตัวที่ 2 ทิศทวนเข็มนาฬิกา

แรงบิด (นิวตันเมตร)	ความเครียดทิศทางทวนเข็มนาฬิกา			
	1st	2nd	3rd	ค่าเฉลี่ย
0.0000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
-0.0151	-0.00980	-0.00980	-0.00980	-0.00980
-0.0450	-0.02940	-0.03020	-0.03000	-0.02987
-0.0920	-0.06350	-0.06160	-0.06190	-0.06233
-0.1460	-0.10200	-0.10100	-0.10010	-0.10103
-0.2001	-0.13760	-0.13840	-0.13850	-0.13817
-0.2548	-0.17830	-0.17550	-0.17900	-0.17760
-0.3105	-0.21980	-0.21900	-0.21830	-0.21903
-0.3670	-0.25690	-0.26420	-0.25920	-0.26010
-0.4247	-0.29830	-0.30500	-0.30050	-0.30127

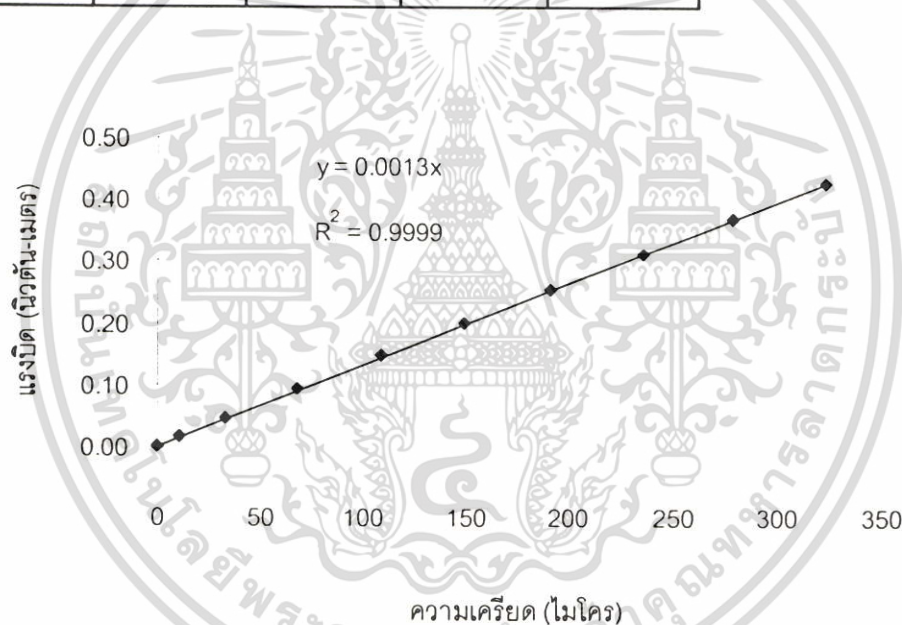


รูปที่ ก.9 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดและค่าความเครียดของการทวนสอบแรงบิดเพลลาขับเคลื่อนทดสอบตัวที่ 2 ทิศทวนเข็มนาฬิกา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.7 ข้อมูลการทวนสอบแรงบิดเพลลาถูกขับเคลื่อนทดสอบตัวที่ 2 ทิศตามเข็มนาฬิกา

แรงบิด (นิวตัน-เมตร)	ความเครียดทิศทางตามเข็มนาฬิกา			
	1st	2nd	3rd	ค่าเฉลี่ย
0.0000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
0.0151	0.01060	0.01100	0.01080	0.01080
0.0450	0.03340	0.03330	0.03320	0.03330
0.0920	0.06620	0.06800	0.06850	0.06757
0.1460	0.10600	0.10850	0.11030	0.10827
0.2001	0.14680	0.15000	0.15200	0.14960
0.2548	0.18860	0.19140	0.19400	0.19133
0.3105	0.23030	0.23760	0.23750	0.23513
0.3670	0.27330	0.28150	0.28030	0.27837
0.4247	0.31660	0.32690	0.32400	0.32250

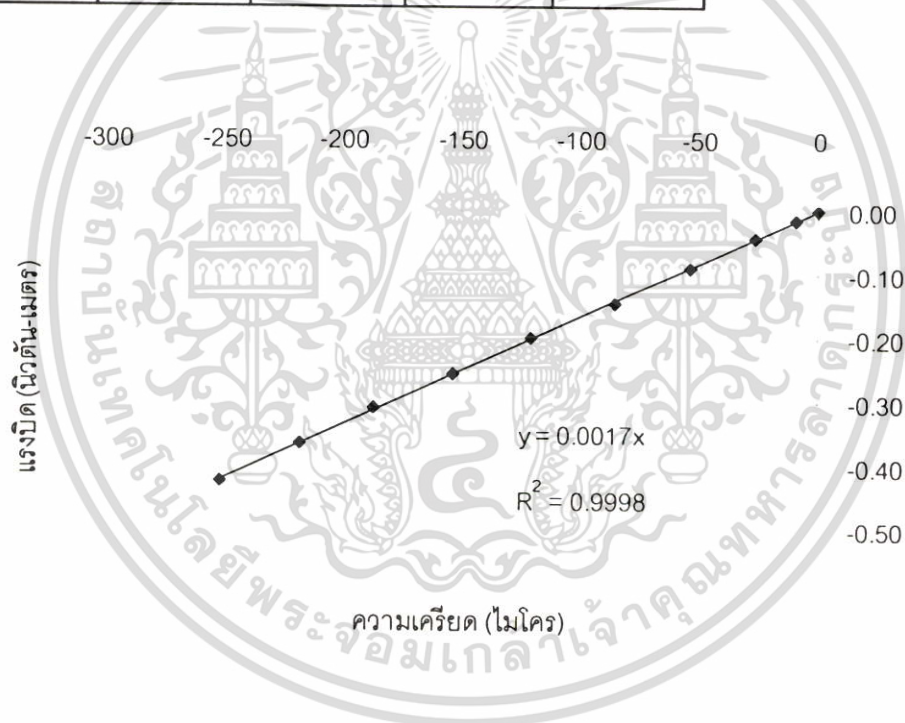


รูปที่ ก.10 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดและค่าความเครียดของการทวนสอบแรงบิดเพลลาถูกขับเคลื่อนทดสอบตัวที่ 2 ทิศตามเข็มนาฬิกา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.8 ข้อมูลการทวนสอบแรงบิดเพลาดูกซ์ชุดทดสอบตัวที่ 2 ทิศทวนเข็มนาฬิกา

แรงบิด (นิวตันเมตร)	ความเครียดทิศทางทวนเข็มนาฬิกา			
	1st	2nd	3rd	ค่าเฉลี่ย
0.0000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
-0.0151	-0.00900	-0.01040	-0.00970	-0.00970
-0.0450	-0.02830	-0.02470	-0.02650	-0.02650
-0.0920	-0.05200	-0.05450	-0.05325	-0.05325
-0.1460	-0.08500	-0.08450	-0.08475	-0.08475
-0.2001	-0.11840	-0.12200	-0.12020	-0.12020
-0.2548	-0.15550	-0.15100	-0.15325	-0.15325
-0.3105	-0.18900	-0.18400	-0.18650	-0.18650
-0.3670	-0.22240	-0.21400	-0.21820	-0.21820
-0.4247	-0.24900	-0.25500	-0.25200	-0.25200

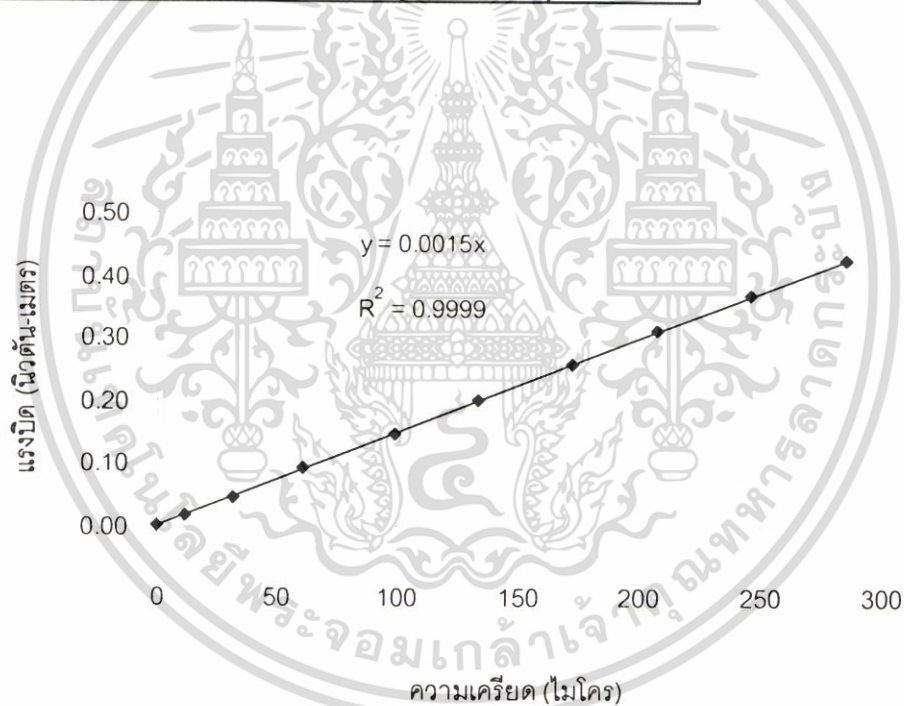


รูปที่ ก.11 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดและค่าความเครียดของการทวนสอบแรงบิดเพลาดูกซ์ชุดทดสอบตัวที่ 2 ทิศทวนเข็มนาฬิกา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.9 ข้อมูลการทวนสอบแรงบิดเพลลาขับเคลื่อนทดสอบตัวที่ 3 ทิศตามเข็มนาฬิกา

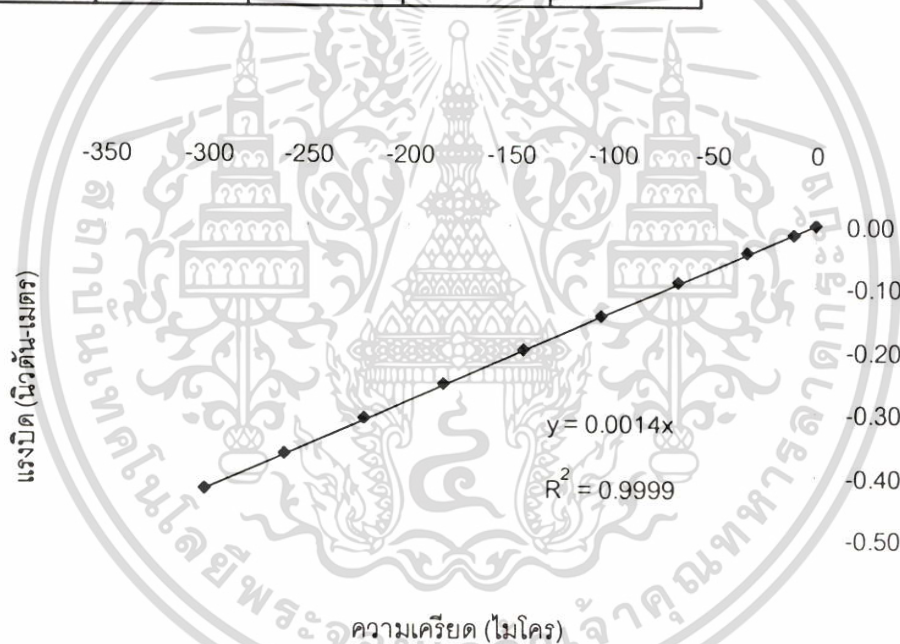
แรงบิด (นิวตัน-เมตร)	ความเครียดทิศทางตามเข็มนาฬิกา			
	1st	2nd	3rd	ค่าเฉลี่ย
0.0000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
0.0151	0.01080	0.01150	0.01200	0.01143
0.0450	0.03120	0.03140	0.03240	0.03167
0.0920	0.06150	0.06100	0.06050	0.06100
0.1460	0.09950	0.09940	0.09900	0.09930
0.2001	0.13300	0.13380	0.13400	0.13360
0.2548	0.16150	0.17290	0.18320	0.17253
0.3105	0.18760	0.21850	0.21830	0.20813
0.3670	0.24500	0.24600	0.24700	0.24600
0.4247	0.28700	0.28620	0.28140	0.28487



รูปที่ ก.12 กราฟแรงบิดและความเครียดของการทวนสอบแรงบิดเพลลาขับเคลื่อนทดสอบตัวที่ 3 ทิศตามเข็มนาฬิกา

ตารางที่ ก.10 ข้อมูลการทวนสอบแรงบิดเพลลาขับเคลื่อนทดสอบตัวที่ 3 ทิศทวนเข็มนาฬิกา

แรงบิด (นิวตันเมตร)	ความเครียดทิศทางทวนเข็มนาฬิกา			
	1st	2nd	3rd	ค่าเฉลี่ย
0.0000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
-0.0151	-0.01130	-0.01020	-0.00980	-0.01043
-0.0450	-0.03530	-0.03200	-0.03230	-0.03320
-0.0920	-0.06920	-0.06600	-0.06580	-0.06700
-0.1460	-0.10730	-0.10440	-0.10300	-0.10490
-0.2001	-0.14450	-0.14390	-0.14000	-0.14280
-0.2548	-0.18430	-0.18320	-0.17880	-0.18210
-0.3105	-0.22250	-0.22080	-0.22080	-0.22137
-0.3670	-0.26180	-0.26080	-0.26080	-0.26113
-0.4247	-0.30010	-0.30100	-0.30200	-0.30103

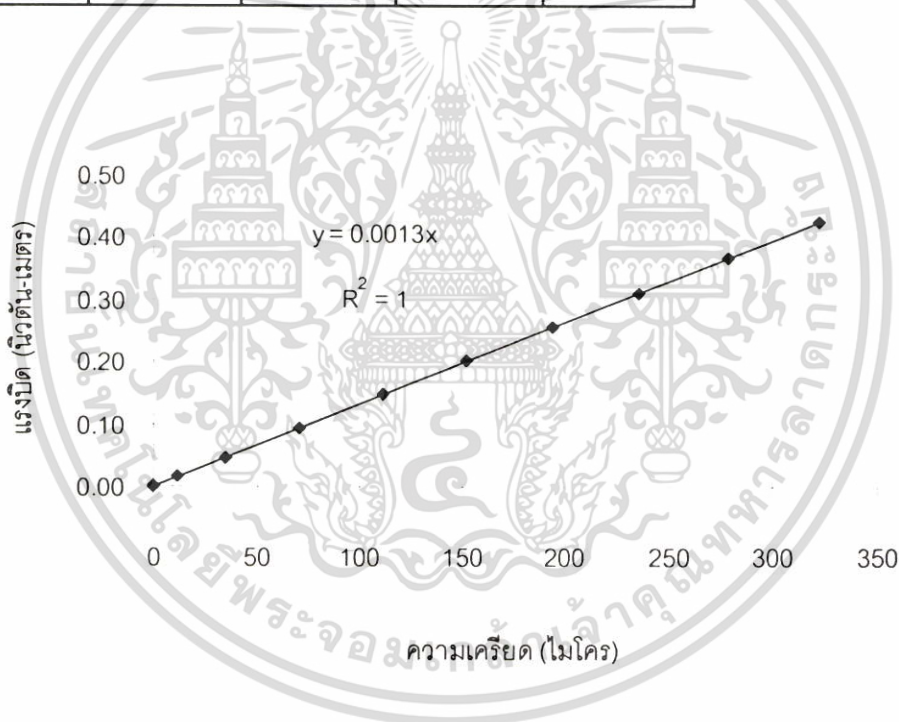


รูปที่ ก.13 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดและค่าความเครียดของการทวนสอบแรงบิดเพลลาขับเคลื่อนทดสอบตัวที่ 3 ทิศทวนเข็มนาฬิกา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.11 ข้อมูลการทวนสอบแรงบิดเพลากลูกข้อต่อทดสอบตัวที่3 ทิศตามเข็มนาฬิกา

แรงบิด (นิวตันเมตร)	ความเครียดทิศทางตามเข็มนาฬิกา			
	1st	2nd	3rd	ค่าเฉลี่ย
0.0000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
0.0151	0.01260	0.01130	0.01090	0.01160
0.0450	0.03650	0.03430	0.03370	0.03483
0.0920	0.07330	0.06960	0.06830	0.07040
0.1460	0.11570	0.11000	0.10810	0.11127
0.2001	0.15770	0.15050	0.14820	0.15213
0.2548	0.19990	0.19190	0.18920	0.19367
0.3105	0.24240	0.23350	0.23100	0.23563
0.3670	0.28500	0.27670	0.27250	0.27807
0.4247	0.32810	0.32150	0.31600	0.32187

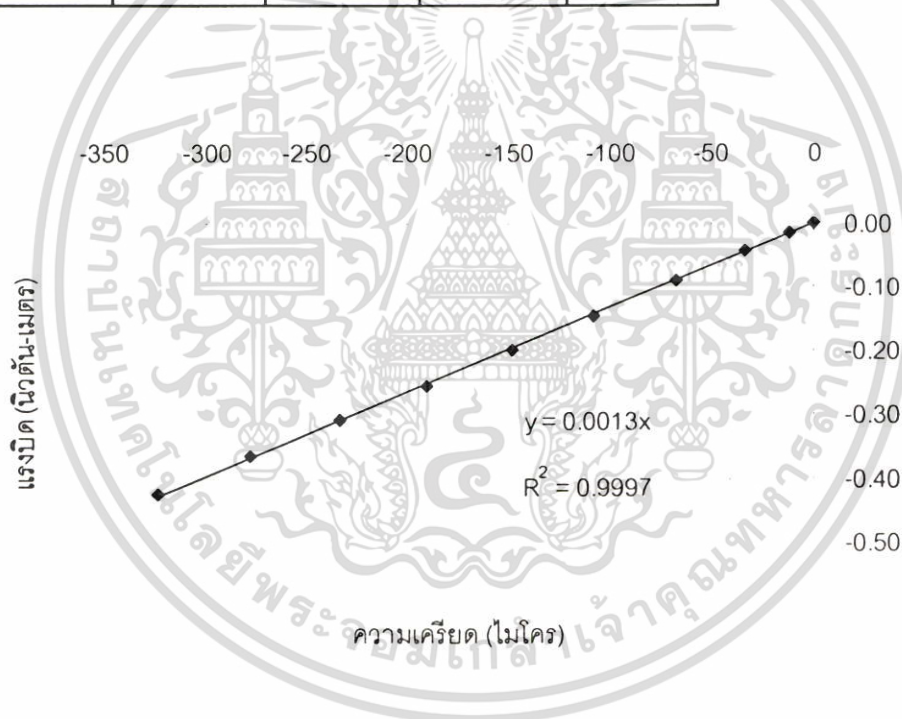


รูปที่ ก.14 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดและค่าความเครียดของการทวนสอบแรงบิดเพลากลูกข้อต่อทดสอบตัวที่ 3 ทิศตามเข็มนาฬิกา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.12 ข้อมูลการทวนสอบแรงบิดเพลากลูกข้อต่อทดสอบตัวที่ 3 ทิศทวนเข็มนาฬิกา

แรงบิด (นิวตันเมตร)	ความเครียดทิศทางทวนเข็มนาฬิกา			
	1st	2nd	3rd	ค่าเฉลี่ย
0.0000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
-0.0151	-0.01200	-0.01180	-0.01120	-0.01167
-0.0450	-0.03470	-0.03360	-0.03290	-0.03373
-0.0920	-0.06660	-0.06820	-0.06740	-0.06740
-0.1460	-0.10700	-0.10760	-0.10690	-0.10717
-0.2001	-0.14740	-0.14950	-0.14780	-0.14823
-0.2548	-0.18950	-0.19150	-0.18860	-0.18987
-0.3105	-0.22800	-0.24120	-0.23080	-0.23333
-0.3670	-0.26950	-0.28930	-0.27650	-0.27843
-0.4247	-0.32750	-0.32400	-0.31900	-0.32350

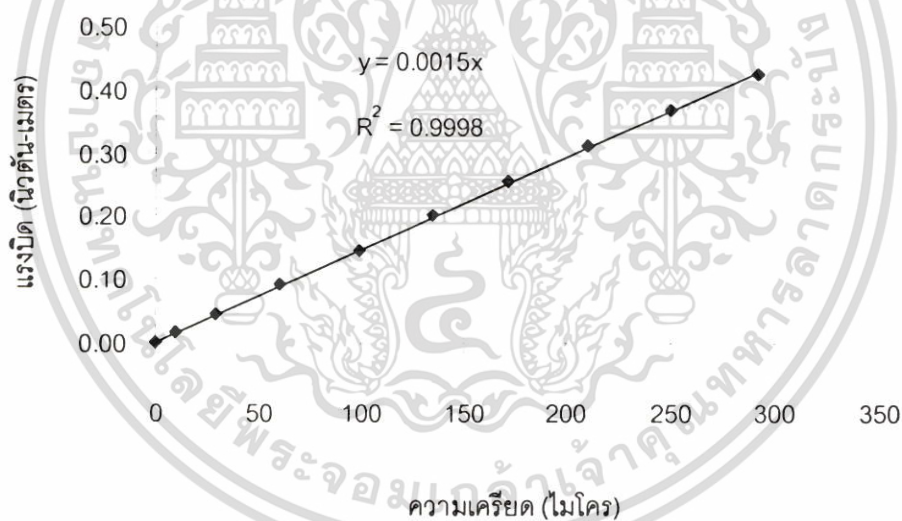


รูปที่ ก.15 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดและค่าความเครียดของการทวนสอบแรงบิดเพลากลูกข้อต่อทดสอบตัวที่ 3 ทิศทวนเข็มนาฬิกา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.13 ข้อมูลการทวนสอบแรงบิดเพลลาขับชุดทดสอบตัวที่ 4 ทิศตามเข็มนาฬิกา

แรงบิด (นิวตันเมตร)	ความเครียดทิศทางตามเข็มนาฬิกา			
	1st	2nd	3rd	ค่าเฉลี่ย
0.0000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
0.0151	0.00890	0.01000	0.01030	0.00973
0.0450	0.02750	0.02950	0.03010	0.02903
0.0920	0.05780	0.06190	0.06140	0.06037
0.1460	0.09650	0.10200	0.09830	0.09893
0.2001	0.13250	0.13600	0.13610	0.13487
0.2548	0.17140	0.17100	0.17240	0.17160
0.3105	0.21030	0.21150	0.21020	0.21067
0.3670	0.25010	0.24820	0.25130	0.24987
0.4247	0.29200	0.29180	0.29260	0.29213

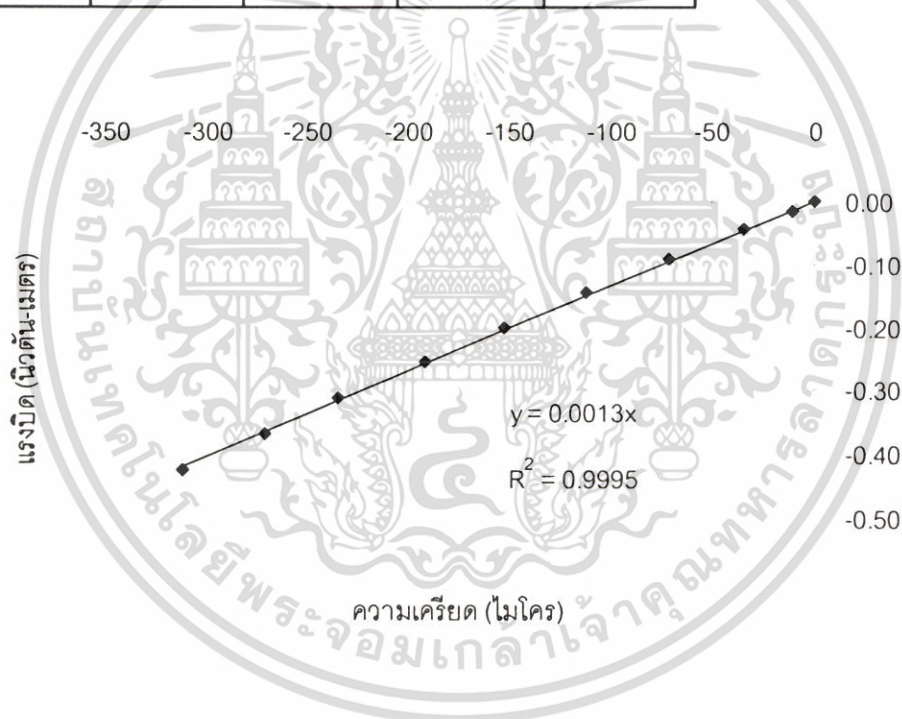


รูปที่ ก.16 กราฟแรงบิดและความเครียดของการทวนสอบแรงบิดเพลลาขับชุดทดสอบตัวที่4 ทิศตามเข็มนาฬิกา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.14 ข้อมูลการทวนสอบแรงบิดเพลลาขับเคลื่อนทดสอบตัวที่ 4 ทิศทวนเข็มนาฬิกา

แรงบิด (นิวตันเมตร)	ความเครียดทิศทางทวนเข็มนาฬิกา			
	1st	2nd	3rd	ค่าเฉลี่ย
0.0000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
-0.0151	-0.01130	-0.01040	-0.01180	-0.01117
-0.0450	-0.03490	-0.03450	-0.03440	-0.03460
-0.0920	-0.07020	-0.07150	-0.07070	-0.07080
-0.1460	-0.11080	-0.11110	-0.11200	-0.11130
-0.2001	-0.15180	-0.15230	-0.15240	-0.15217
-0.2548	-0.19000	-0.18500	-0.19890	-0.19130
-0.3105	-0.23500	-0.23400	-0.23380	-0.23427
-0.3670	-0.27120	-0.27180	-0.27080	-0.27127
-0.4247	-0.31150	-0.31100	-0.31200	-0.31150

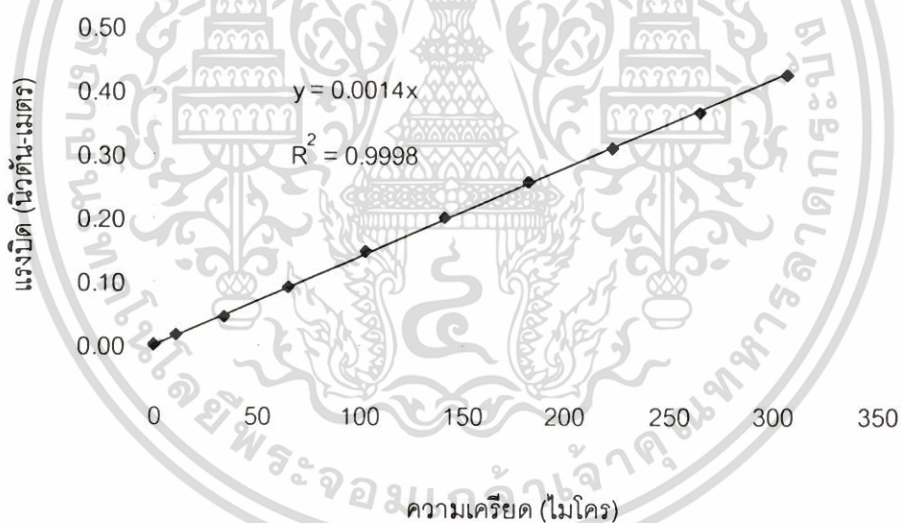


รูปที่ ก.17 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดและค่าความเครียดของการทวนสอบแรงบิดเพลลาขับเคลื่อนทดสอบตัวที่ 4 ทิศทวนเข็มนาฬิกา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.15 ข้อมูลการทวนสอบแรงบิดเพลลาถูกขับเคลื่อนทดสอบตัวที่ 4 ทิศตามเข็มนาฬิกา

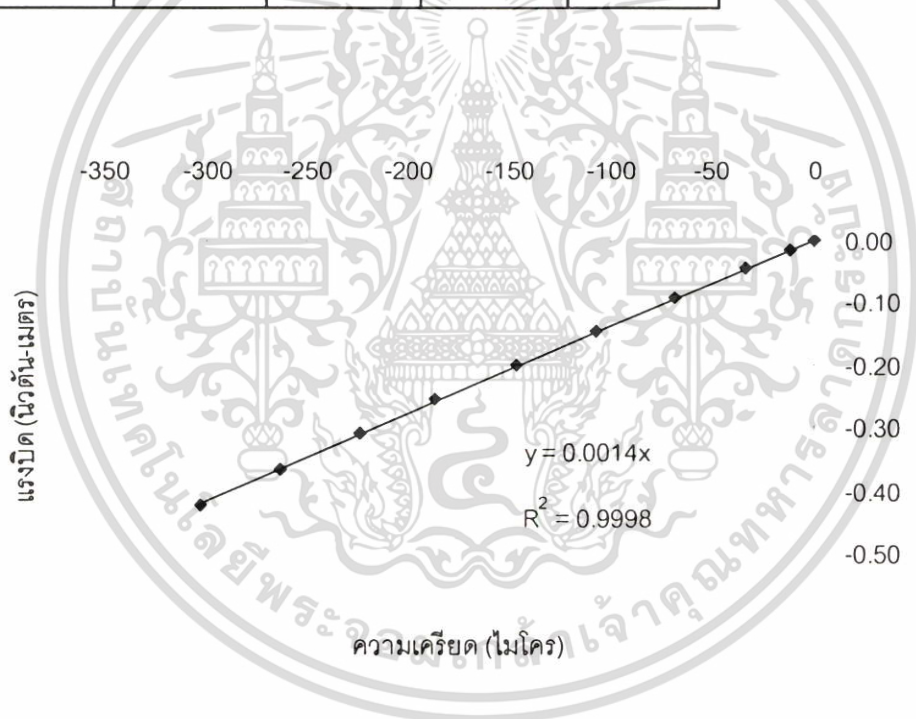
แรงบิด (นิวตันเมตร)	ความเครียดทิศทางตามเข็มนาฬิกา			
	1st	2nd	3rd	ค่าเฉลี่ย
0.0000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
0.0151	0.01080	0.01130	0.00970	0.01060
0.0450	0.03400	0.03420	0.03230	0.03350
0.0920	0.06950	0.06900	0.05750	0.06533
0.1460	0.11020	0.10330	0.09440	0.10263
0.2001	0.14840	0.13810	0.13800	0.14150
0.2548	0.18730	0.17940	0.17960	0.18210
0.3105	0.23220	0.21860	0.21900	0.22327
0.3670	0.27800	0.25790	0.25840	0.26477
0.4247	0.31840	0.30020	0.30100	0.30653



รูปที่ ก.18 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดและค่าความเครียดของการทวนสอบแรงบิดเพลลาถูกขับเคลื่อนทดสอบตัวที่ 4 ทิศตามเข็มนาฬิกา

ตารางที่ ก.16 ข้อมูลการทวนสอบแรงบิดเพลาดูกซ์ชุดทดสอบตัวที่ 4 ทิศทวนเข็มนาฬิกา

แรงบิด (นิวตันเมตร)	ความเครียดทิศทางทวนเข็มนาฬิกา			
	1st	2nd	3rd	ค่าเฉลี่ย
0.0000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
-0.0151	-0.01480	-0.01080	-0.01080	-0.01213
-0.0450	-0.03770	-0.03180	-0.03180	-0.03377
-0.0920	-0.07250	-0.06520	-0.06530	-0.06767
-0.1460	-0.11220	-0.10380	-0.10390	-0.10663
-0.2001	-0.15200	-0.14290	-0.14290	-0.14593
-0.2548	-0.19250	-0.18280	-0.18250	-0.18593
-0.3105	-0.23360	-0.21900	-0.21920	-0.22393
-0.3670	-0.27400	-0.25840	-0.25850	-0.26363
-0.4247	-0.31140	-0.29950	-0.29800	-0.30297



รูปที่ ก.19 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดและค่าความเครียดของการทวนสอบแรงบิดเพลาดูกซ์ชุดทดสอบตัวที่ 4 ทิศทวนเข็มนาฬิกา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.1 ผลการทดสอบการสึกหรอของเฟืองโพลีเอทิลีนที่สภาวะ SR = 0.25 ความเร็วรอบ 1,000 รอบต่อนาที

ตำแหน่งจาก ยอดเฟือง (มม)	ความลึกของการสึกหรอ (มม) ที่จำนวนรอบ										
	0	500,000	1,000,000	1,500,000	2,000,000	2,500,000	3,000,000	3,500,000	4,000,000	4,500,000	5,000,000
0.25	0	0.03334	0.04526	0.04821	0.05063	0.05221	0.05498	0.05688	0.05784	0.05851	0.05896
0.75	0	0.03148	0.04368	0.04797	0.05000	0.05246	0.05410	0.05598	0.05715	0.05786	0.05824
1.25	0	0.03704	0.04624	0.05368	0.05834	0.06060	0.06237	0.06415	0.06513	0.06703	0.06798
1.75	0	0.03334	0.04526	0.04801	0.05042	0.05261	0.05419	0.05605	0.05763	0.05823	0.05847
ความลึกเฉลี่ย	0	0.03380	0.04511	0.04947	0.05235	0.05447	0.05641	0.05826	0.05944	0.06041	0.06091

ตารางที่ ข.2 ผลการทดสอบการสึกหรอของเฟืองโพลีเอทิลีนที่สภาวะ SR = 0.25 ความเร็วรอบ 1,500 รอบต่อนาที

ตำแหน่งจาก ยอดเฟือง (มม)	ความลึกของการสึกหรอ (มม) ที่จำนวนรอบ										
	0	500,000	1,000,000	1,500,000	2,000,000	2,500,000	3,000,000	3,500,000	4,000,000	4,500,000	5,000,000
0.25	0	0.03595	0.04880	0.05199	0.05459	0.05630	0.05929	0.06133	0.06237	0.06309	0.06358
0.75	0	0.03395	0.04711	0.05172	0.05392	0.05657	0.05834	0.06036	0.06163	0.06240	0.06280
1.25	0	0.03994	0.04986	0.05788	0.06291	0.06535	0.06726	0.06917	0.07023	0.07228	0.07330
1.75	0	0.03595	0.04880	0.05177	0.05437	0.05674	0.05843	0.06044	0.06215	0.06279	0.06305
ความลึกเฉลี่ย	0	0.03645	0.04864	0.05334	0.05645	0.05874	0.06083	0.06283	0.06409	0.06514	0.06568

ตารางที่ ข.3 ผลการทดสอบการสึกหรอของเฟืองโพลีเอทิลีนที่สภาวะ SR = 0.25 ความเร็วรอบ 2,000 รอบต่อนาที

ตำแหน่งจาก ยอดเฟือง (มม)	ความลึกของการสึกหรอ (มม) ที่จำนวนรอบ										
	0	500,000	1,000,000	1,500,000	2,000,000	2,500,000	3,000,000	3,500,000	4,000,000	4,500,000	5,000,000
0.25	0	0.04016	0.05453	0.05809	0.06100	0.06290	0.06624	0.06853	0.06969	0.07049	0.07103
0.75	0	0.03793	0.05263	0.05779	0.06025	0.06321	0.06518	0.06744	0.06886	0.06972	0.07017
1.25	0	0.04463	0.05571	0.06467	0.07029	0.07301	0.07515	0.07729	0.07847	0.08076	0.08190
1.75	0	0.04016	0.05453	0.05784	0.06075	0.06339	0.06529	0.06753	0.06944	0.07016	0.07045
ความลึกเฉลี่ย	0	0.04072	0.05435	0.05960	0.06307	0.06563	0.06797	0.07020	0.07161	0.07278	0.07339

ตารางที่ ข.4 ผลการทดสอบการสึกหรอของเฟืองโพลีเอทิลีนที่สภาวะ SR = 0.5 ความเร็วรอบ 1,000 รอบต่อนาที

ตำแหน่งจาก ยอดเฟือง (มม)	ความลึกของการสึกหรอ (มม) ที่จำนวนรอบ										
	0	500,000	1,000,000	1,500,000	2,000,000	2,500,000	3,000,000	3,500,000	4,000,000	4,500,000	5,000,000
0.25	0	0.04065	0.05519	0.05879	0.06174	0.06367	0.06705	0.06936	0.07053	0.07135	0.07190
0.75	0	0.03839	0.05327	0.05849	0.06098	0.06398	0.06597	0.06826	0.06969	0.07056	0.07102
1.25	0	0.04517	0.05639	0.06546	0.07114	0.07390	0.07606	0.07823	0.07956	0.08168	0.08190
1.75	0	0.04065	0.05519	0.05854	0.06149	0.06416	0.06608	0.06835	0.07028	0.07101	0.07130
ความลึกเฉลี่ย	0	0.04122	0.05501	0.06032	0.06384	0.06643	0.06879	0.07105	0.07252	0.07365	0.07403

ตารางที่ ข.5 ผลการทดสอบการสึกหรอของเฟืองโพลีเอทิลีนที่สภาวะ SR = 0.5 ความเร็วรอบ 1,500 รอบต่อนาที

ตำแหน่งจาก ยอดเฟือง (มม)	ความลึกของการสึกหรอ (มม) ที่จำนวนรอบ										
	0	500,000	1,000,000	1,500,000	2,000,000	2,500,000	3,000,000	3,500,000	4,000,000	4,500,000	5,000,000
0.25	0	0.04410	0.05987	0.06377	0.06697	0.06906	0.07273	0.07524	0.07651	0.07739	0.07799
0.75	0	0.04165	0.05779	0.06345	0.06615	0.06940	0.07157	0.07405	0.07560	0.07654	0.07704
1.25	0	0.04900	0.06117	0.07101	0.07717	0.08017	0.08251	0.08486	0.08680	0.08867	0.08992
1.75	0	0.04410	0.05987	0.06351	0.06670	0.06960	0.07168	0.07414	0.07624	0.07703	0.07735
ความลึกเฉลี่ย	0	0.04471	0.05967	0.06544	0.06925	0.07206	0.07462	0.07707	0.07879	0.07991	0.08058

ตารางที่ ข.6 ผลการทดสอบการสึกหรอของเฟืองโพลีเอทิลีนที่สภาวะ SR = 0.5 ความเร็วรอบ 2,000 รอบต่อนาที

ตำแหน่งจาก ยอดเฟือง (มม)	ความลึกของการสึกหรอ (มม) ที่จำนวนรอบ										
	0	500,000	1,000,000	1,500,000	2,000,000	2,500,000	3,000,000	3,500,000	4,000,000	4,500,000	5,000,000
0.25	0	0.05069	0.06882	0.07330	0.07698	0.07938	0.08360	0.08649	0.08795	0.08896	0.08965
0.75	0	0.04787	0.06642	0.07293	0.07603	0.07977	0.08226	0.08511	0.08690	0.08798	0.08855
1.25	0	0.05632	0.07031	0.08162	0.08870	0.09214	0.09484	0.09754	0.09920	0.10192	0.10336
1.75	0	0.05069	0.06882	0.07300	0.07667	0.08000	0.08239	0.08522	0.08763	0.08854	0.08891
ความลึกเฉลี่ย	0	0.05139	0.06859	0.07521	0.07960	0.08283	0.08577	0.08859	0.09042	0.09185	0.09262

ตารางที่ ข.7 ผลการทดสอบการสึกหรอของเฟืองโพลีเอทิลีนที่สภาวะ SR = 0.75 ความเร็วรอบ 1,000 รอบต่อนาที

ตำแหน่งจาก ยอดเฟือง (มม)	ความลึกของการสึกหรอ (มม) ที่จำนวนรอบ										
	0	500,000	1,000,000	1,500,000	2,000,000	2,500,000	3,000,000	3,500,000	4,000,000	4,500,000	5,000,000
0.25	0	0.04608	0.06256	0.06664	0.06998	0.07216	0.07600	0.07862	0.07995	0.08087	0.08150
0.75	0	0.04352	0.06038	0.06630	0.06912	0.07252	0.07478	0.07738	0.07900	0.07998	0.08050
1.25	0	0.05120	0.06392	0.07420	0.08064	0.08377	0.08621	0.08867	0.09003	0.09189	0.09210
1.75	0	0.04608	0.06256	0.06636	0.06970	0.07273	0.07491	0.07747	0.07966	0.08049	0.08083
ความลึกเฉลี่ย	0	0.04672	0.06236	0.06838	0.07236	0.07530	0.07798	0.08054	0.08216	0.08331	0.08373

ตารางที่ ข.8 ผลการทดสอบการสึกหรอของเฟืองโพลีเอทิลีนที่สภาวะ SR = 0.75 ความเร็วรอบ 1,500 รอบต่อนาที

ตำแหน่งจาก ยอดเฟือง (มม)	ความลึกของการสึกหรอ (มม) ที่จำนวนรอบ										
	0	500,000	1,000,000	1,500,000	2,000,000	2,500,000	3,000,000	3,500,000	4,000,000	4,500,000	5,000,000
0.25	0	0.05092	0.06913	0.07364	0.07733	0.07974	0.08398	0.08688	0.08834	0.08937	0.09006
0.75	0	0.04809	0.06672	0.07327	0.07638	0.08013	0.08264	0.08550	0.08730	0.08838	0.08896
1.25	0	0.05658	0.07063	0.08199	0.08911	0.09256	0.09527	0.09798	0.09948	0.10198	0.10250
1.75	0	0.05092	0.06913	0.07333	0.07701	0.08036	0.08277	0.08560	0.08803	0.08894	0.08931
ความลึกเฉลี่ย	0	0.05163	0.06890	0.07556	0.07996	0.08320	0.08616	0.08899	0.09079	0.09217	0.09271

ตารางที่ ข.9 ผลการทดสอบการสึกหรอของเฟืองโพลีเอทิลีนที่สภาวะ SR = 0.75 ความเร็วรอบ 2,000 รอบต่อนาที

ตำแหน่งจาก ยอดเฟือง (มม)	ความลึกของการสึกหรอ (มม) ที่จำนวนรอบ										
	0	500,000	1,000,000	1,500,000	2,000,000	2,500,000	3,000,000	3,500,000	4,000,000	4,500,000	5,000,000
0.25	0	0.05760	0.07820	0.08330	0.08748	0.09021	0.09500	0.09828	0.09994	0.10109	0.10187
0.75	0	0.05440	0.07548	0.08288	0.08640	0.09065	0.09348	0.09672	0.09875	0.09998	0.10063
1.25	0	0.06400	0.07990	0.09275	0.10080	0.10471	0.10777	0.11084	0.11253	0.11582	0.11745
1.75	0	0.05760	0.07820	0.08295	0.08712	0.09091	0.09363	0.09684	0.09958	0.10061	0.10103
ความลึกเฉลี่ย	0	0.05840	0.07795	0.08547	0.09045	0.09412	0.09747	0.10067	0.10270	0.10438	0.10525

ตารางที่ ข.10 ผลการทดสอบการสึกหรอของเฟืองโพลีเอไมด์ที่สภาวะ SR = 0.25 ความเร็วรอบ 1,000 รอบต่อนาที

ตำแหน่งจาก ยอดเฟือง (มม)	ความลึกของการสึกหรอ (มม) ที่จำนวนรอบ										
	0	500,000	1,000,000	1,500,000	2,000,000	2,500,000	3,000,000	3,500,000	4,000,000	4,500,000	5,000,000
0.25	0	0.01079	0.01377	0.01423	0.01457	0.01461	0.01499	0.01509	0.01517	0.01523	0.01527
0.75	0	0.01019	0.01329	0.01416	0.01440	0.01468	0.01475	0.01485	0.01499	0.01507	0.01509
1.25	0	0.01199	0.01406	0.01584	0.01679	0.01695	0.01701	0.01707	0.01744	0.01745	0.01761
1.75	0	0.01079	0.01377	0.01417	0.01452	0.01472	0.01477	0.01487	0.01512	0.01516	0.01515
ความลึกเฉลี่ย	0	0.01094	0.01372	0.01460	0.01507	0.01524	0.01538	0.01547	0.01568	0.01573	0.01578

ตารางที่ ข.11 ผลการทดสอบการสึกหรอของเฟืองโพลีเอไมด์ที่สภาวะ SR = 0.25 ความเร็วรอบ 1,500 รอบต่อนาที

ตำแหน่งจาก ยอดเฟือง (มม)	ความลึกของการสึกหรอ (มม) ที่จำนวนรอบ										
	0	500,000	1,000,000	1,500,000	2,000,000	2,500,000	3,000,000	3,500,000	4,000,000	4,500,000	5,000,000
0.25	0	0.01334	0.01717	0.01765	0.01799	0.01806	0.01853	0.01862	0.01875	0.01881	0.01887
0.75	0	0.01260	0.01657	0.01756	0.01777	0.01814	0.01823	0.01833	0.01853	0.01860	0.01864
1.25	0	0.01483	0.01754	0.01965	0.02073	0.02096	0.02102	0.02119	0.02156	0.02155	0.02177
1.75	0	0.01334	0.01717	0.01757	0.01792	0.01820	0.01826	0.01835	0.01868	0.01872	0.01872
ความลึกเฉลี่ย	0	0.01353	0.01711	0.01811	0.01860	0.01884	0.01901	0.01913	0.01938	0.01942	0.01950

ตารางที่ ข.12 ผลการทดสอบการสึกหรอของเฟืองโพลีเอไมด์ที่สภาวะ SR = 0.25 ความเร็วรอบ 2,000 รอบต่อนาที

ตำแหน่งจาก ยอดเฟือง (มม)	ความลึกของการสึกหรอ (มม) ที่จำนวนรอบ										
	0	500,000	1,000,000	1,500,000	2,000,000	2,500,000	3,000,000	3,500,000	4,000,000	4,500,000	5,000,000
0.25	0	0.01561	0.01997	0.02045	0.02077	0.02080	0.02169	0.02187	0.02183	0.02182	0.02190
0.75	0	0.01475	0.01927	0.02035	0.02052	0.02090	0.02134	0.02153	0.02157	0.02158	0.02164
1.25	0	0.01735	0.02040	0.02276	0.02394	0.02414	0.02460	0.02466	0.02509	0.02500	0.02526
1.75	0	0.01561	0.01997	0.02036	0.02069	0.02096	0.02137	0.02154	0.02175	0.02172	0.02172
ความลึกเฉลี่ย	0	0.01583	0.01990	0.02098	0.02148	0.02170	0.02225	0.02240	0.02256	0.02253	0.02263

ตารางที่ ข.13 ผลการทดสอบการสึกหรอของเฟืองโพลีเอไมด์ที่สภาวะ SR = 0.5 ความเร็วรอบ 1,000 รอบต่อนาที

ตำแหน่งจาก ยอดเฟือง (มม)	ความลึกของการสึกหรอ (มม) ที่จำนวนรอบ										
	0	500,000	1,000,000	1,500,000	2,000,000	2,500,000	3,000,000	3,500,000	4,000,000	4,500,000	5,000,000
0.25	0	0.01198	0.01531	0.01584	0.01618	0.01623	0.01664	0.01678	0.01684	0.01691	0.01698
0.75	0	0.01132	0.01478	0.01576	0.01598	0.01631	0.01638	0.01651	0.01664	0.01672	0.01677
1.25	0	0.01332	0.01565	0.01764	0.01864	0.01884	0.01888	0.01892	0.01934	0.01930	0.01945
1.75	0	0.01198	0.01531	0.01578	0.01611	0.01636	0.01640	0.01653	0.01678	0.01683	0.01684
ความลึกเฉลี่ย	0	0.01215	0.01526	0.01626	0.01673	0.01694	0.01708	0.01718	0.01740	0.01744	0.01751

ตารางที่ ข.14 ผลการทดสอบการสึกหรอของเฟืองโพลีเอไมด์ที่สภาวะ SR = 0.5 ความเร็วรอบ 1,500 รอบต่อนาที

ตำแหน่งจาก ยอดเฟือง (มม)	ความลึกของการสึกหรอ (มม) ที่จำนวนรอบ										
	0	500,000	1,000,000	1,500,000	2,000,000	2,500,000	3,000,000	3,500,000	4,000,000	4,500,000	5,000,000
0.25	0	0.01393	0.01780	0.01842	0.01881	0.01887	0.01935	0.01951	0.01959	0.01966	0.01974
0.75	0	0.01316	0.01719	0.01833	0.01858	0.01897	0.01904	0.01920	0.01935	0.01945	0.01950
1.25	0	0.01548	0.01819	0.02051	0.02168	0.02191	0.02195	0.02200	0.02249	0.02253	0.02276
1.75	0	0.01393	0.01780	0.01835	0.01873	0.01902	0.01907	0.01922	0.01952	0.01957	0.01958
ความลึกเฉลี่ย	0	0.01413	0.01775	0.01890	0.01945	0.01969	0.01986	0.01998	0.02024	0.02030	0.02039

ตารางที่ ข.15 ผลการทดสอบการสึกหรอของเฟืองโพลีเอไมด์ที่สภาวะ SR = 0.5 ความเร็วรอบ 2,000 รอบต่อนาที

ตำแหน่งจาก ยอดเฟือง (มม)	ความลึกของการสึกหรอ (มม) ที่จำนวนรอบ										
	0	500,000	1,000,000	1,500,000	2,000,000	2,500,000	3,000,000	3,500,000	4,000,000	4,500,000	5,000,000
0.25	0	0.01639	0.02095	0.02168	0.02213	0.02220	0.02277	0.02295	0.02304	0.02313	0.02322
0.75	0	0.01548	0.02022	0.02157	0.02186	0.02231	0.02240	0.02259	0.02277	0.02288	0.02294
1.25	0	0.01821	0.02140	0.02413	0.02550	0.02577	0.02583	0.02588	0.02595	0.02650	0.02678
1.75	0	0.01639	0.02095	0.02158	0.02204	0.02238	0.02244	0.02261	0.02296	0.02302	0.02303
ความลึกเฉลี่ย	0	0.01662	0.02088	0.02224	0.02288	0.02317	0.02336	0.02351	0.02368	0.02388	0.02399

ตารางที่ ข.16 ผลการทดสอบการสึกหรอของเฟืองโพลีเอไมด์ที่สภาวะ SR = 0.75 ความเร็วรอบ 1,000 รอบต่อนาที

ตำแหน่งจาก ยอดเฟือง (มม)	ความลึกของการสึกหรอ (มม) ที่จำนวนรอบ										
	0	500,000	1,000,000	1,500,000	2,000,000	2,500,000	3,000,000	3,500,000	4,000,000	4,500,000	5,000,000
0.25	0	0.01442	0.01843	0.01907	0.01947	0.01953	0.02003	0.02019	0.02027	0.02035	0.02043
0.75	0	0.01362	0.01779	0.01897	0.01923	0.01963	0.01971	0.01987	0.02003	0.02013	0.02018
1.25	0	0.01602	0.01883	0.02083	0.02179	0.02243	0.02272	0.02277	0.02283	0.02279	0.02282
1.75	0	0.01442	0.01843	0.01899	0.01939	0.01969	0.01974	0.01989	0.02020	0.02025	0.02026
ความลึกเฉลี่ย	0	0.01462	0.01837	0.01947	0.01997	0.02032	0.02055	0.02068	0.02083	0.02088	0.02092

ตารางที่ ข.17 ผลการทดสอบการสึกหรอของเฟืองโพลีเอไมด์ที่สภาวะ SR = 0.75 ความเร็วรอบ 1,500 รอบต่อนาที

ตำแหน่งจาก ยอดเฟือง (มม)	ความลึกของการสึกหรอ (มม) ที่จำนวนรอบ										
	0	500,000	1,000,000	1,500,000	2,000,000	2,500,000	3,000,000	3,500,000	4,000,000	4,500,000	5,000,000
0.25	0	0.01588	0.02029	0.02099	0.02144	0.02151	0.02205	0.02223	0.02232	0.02241	0.02249
0.75	0	0.01500	0.01958	0.02089	0.02117	0.02161	0.02170	0.02188	0.02205	0.02216	0.02222
1.25	0	0.01764	0.02073	0.02294	0.02399	0.02470	0.02502	0.02507	0.02509	0.02510	0.02512
1.75	0	0.01588	0.02029	0.02091	0.02135	0.02167	0.02174	0.02190	0.02224	0.02230	0.02231
ความลึกเฉลี่ย	0	0.01610	0.02022	0.02143	0.02199	0.02237	0.02263	0.02277	0.02292	0.02299	0.02304

ตารางที่ ข.18 ผลการทดสอบการสึกหรอของเฟืองโพลีเอไมด์ที่สภาวะ SR = 0.75 ความเร็วรอบ 2,000 รอบต่อนาที

ตำแหน่งจาก ยอดเฟือง (มม)	ความลึกของการสึกหรอ (มม) ที่จำนวนรอบ										
	0	500,000	1,000,000	1,500,000	2,000,000	2,500,000	3,000,000	3,500,000	4,000,000	4,500,000	5,000,000
0.25	0	0.01800	0.02300	0.02380	0.02430	0.02438	0.02500	0.02520	0.02530	0.02540	0.02550
0.75	0	0.01700	0.02220	0.02368	0.02400	0.02450	0.02460	0.02480	0.02500	0.02512	0.02519
1.25	0	0.02000	0.02350	0.02600	0.02720	0.02800	0.02836	0.02842	0.02849	0.02900	0.02920
1.75	0	0.01800	0.02300	0.02370	0.02420	0.02457	0.02464	0.02483	0.02521	0.02528	0.02529
ความลึกเฉลี่ย	0	0.01825	0.02293	0.02430	0.02493	0.02536	0.02565	0.02581	0.02600	0.02620	0.02629

ตารางที่ ข.19 ผลการทดสอบการสึกหรอของเฟืองเหล็กหล่อเบอร์ 30 ที่สภาวะ SR = 0.25 ความเร็วรอบ 1,000 รอบต่อนาที

ตำแหน่งจาก ยอดเฟือง (มม)	ความลึกของการสึกหรอ (มม) ที่จำนวนรอบ										
	0	500,000	1,000,000	1,500,000	2,000,000	2,500,000	3,000,000	3,500,000	4,000,000	4,500,000	5,000,000
0.25	0	0.02306	0.03895	0.05035	0.05293	0.06573	0.07118	0.07432	0.07808	0.09401	0.11936
0.75	0	0.02047	0.03301	0.04664	0.05192	0.06402	0.06868	0.07113	0.07252	0.08557	0.11177
1.25	0	0.04295	0.04888	0.06034	0.07076	0.09942	0.11206	0.11712	0.12300	0.13536	0.17053
1.75	0	0.03655	0.04953	0.05428	0.05864	0.06936	0.08664	0.09274	0.10048	0.10818	0.12885
ความลึกเฉลี่ย	0	0.03076	0.04259	0.05290	0.05856	0.07463	0.08464	0.08883	0.09352	0.10578	0.13263

ตารางที่ ข.20 ผลการทดสอบการสึกหรอของเฟืองเหล็กหล่อเบอร์ 30 ที่สภาวะ SR = 0.25 ความเร็วรอบ 1,500 รอบต่อนาที

ตำแหน่งจาก ยอดเฟือง (มม)	ความลึกของการสึกหรอ (มม) ที่จำนวนรอบ										
	0	500,000	1,000,000	1,500,000	2,000,000	2,500,000	3,000,000	3,500,000	4,000,000	4,500,000	5,000,000
0.25	0	0.02454	0.03991	0.05352	0.05568	0.06944	0.07641	0.07914	0.08316	0.10013	0.12712
0.75	0	0.02178	0.03382	0.04958	0.05462	0.06763	0.07372	0.07574	0.07723	0.09113	0.11903
1.25	0	0.04572	0.05693	0.06455	0.07725	0.10761	0.12134	0.12472	0.13100	0.14416	0.18162
1.75	0	0.03890	0.05075	0.05771	0.06169	0.07326	0.09300	0.09875	0.10701	0.11522	0.13722
ความลึกเฉลี่ย	0	0.03274	0.04535	0.05634	0.06231	0.07948	0.09112	0.09459	0.09960	0.11266	0.14125

ตารางที่ ข.21 ผลการทดสอบการสึกหรอของเฟืองเหล็กหล่อเบอร์ 30 ที่สภาวะ SR = 0.25 ความเร็วรอบ 2,000 รอบต่อนาที

ตำแหน่งจาก ยอดเฟือง (มม)	ความลึกของการสึกหรอ (มม) ที่จำนวนรอบ										
	0	500,000	1,000,000	1,500,000	2,000,000	2,500,000	3,000,000	3,500,000	4,000,000	4,500,000	5,000,000
0.25	0	0.02736	0.04625	0.05982	0.06282	0.07809	0.08574	0.08829	0.09276	0.11168	0.14180
0.75	0	0.02429	0.03920	0.05542	0.06162	0.07606	0.08272	0.08449	0.08615	0.10165	0.13277
1.25	0	0.05098	0.05805	0.07170	0.08397	0.11810	0.13615	0.13913	0.14613	0.16079	0.20259
1.75	0	0.04338	0.05882	0.06451	0.06959	0.08239	0.10435	0.11016	0.11936	0.12852	0.15306
ความลึกเฉลี่ย	0	0.03650	0.05058	0.06286	0.06950	0.08866	0.10224	0.10552	0.11110	0.12566	0.15755

ตารางที่ ข.22 ผลการทดสอบการสึกหรอของเฟืองเหล็กหล่อเบอร์ 30 ที่สภาวะ SR = 0.5 ความเร็วรอบ 1,000 รอบต่อนาที

ตำแหน่งจาก ยอดเฟือง (มม)	ความลึกของการสึกหรอ (มม) ที่จำนวนรอบ										
	0	500,000	1,000,000	1,500,000	2,000,000	2,500,000	3,000,000	3,500,000	4,000,000	4,500,000	5,000,000
0.25	0	0.02562	0.04327	0.05645	0.05888	0.07320	0.08019	0.08257	0.08675	0.10446	0.13262
0.75	0	0.02274	0.03667	0.05229	0.05775	0.07130	0.07736	0.07903	0.08057	0.09507	0.12418
1.25	0	0.04773	0.05430	0.06551	0.07814	0.10992	0.12101	0.13013	0.13666	0.15039	0.18949
1.75	0	0.04062	0.05502	0.06086	0.06523	0.07724	0.09759	0.10303	0.11164	0.12020	0.14316
ความลึกเฉลี่ย	0	0.03418	0.04732	0.05878	0.06500	0.08292	0.09404	0.09869	0.10391	0.11753	0.14736

ตารางที่ ข.23 ผลการทดสอบการสึกหรอของเฟืองเหล็กหล่อเบอร์ 30 ที่สภาวะ SR = 0.5 ความเร็วรอบ 1,500 รอบต่อนาที

ตำแหน่งจาก ยอดเฟือง (มม)	ความลึกของการสึกหรอ (มม) ที่จำนวนรอบ										
	0	500,000	1,000,000	1,500,000	2,000,000	2,500,000	3,000,000	3,500,000	4,000,000	4,500,000	5,000,000
0.25	0	0.02823	0.04767	0.06219	0.06487	0.08065	0.08835	0.09098	0.09558	0.11509	0.14612
0.75	0	0.02505	0.04040	0.05761	0.06363	0.07856	0.08524	0.08707	0.08877	0.10474	0.13682
1.25	0	0.05259	0.05983	0.07218	0.08609	0.12111	0.13782	0.14337	0.15057	0.16569	0.20877
1.75	0	0.04475	0.06062	0.06706	0.07187	0.08511	0.10753	0.11352	0.12300	0.13244	0.15773
ความลึกเฉลี่ย	0	0.03766	0.05213	0.06476	0.07161	0.09136	0.10473	0.10873	0.11448	0.12949	0.16236

ตารางที่ ข.24 ผลการทดสอบการสึกหรอของเฟืองเหล็กหล่อเบอร์ 30 ที่สภาวะ SR = 0.5 ความเร็วรอบ 2,000 รอบต่อนาที

ตำแหน่งจาก ยอดเฟือง (มม)	ความลึกของการสึกหรอ (มม) ที่จำนวนรอบ										
	0	500,000	1,000,000	1,500,000	2,000,000	2,500,000	3,000,000	3,500,000	4,000,000	4,500,000	5,000,000
0.25	0	0.03382	0.05711	0.07451	0.07772	0.09663	0.10584	0.10899	0.11451	0.13788	0.17506
0.75	0	0.03002	0.04840	0.06902	0.07623	0.09412	0.10212	0.10431	0.10635	0.12549	0.16392
1.25	0	0.06300	0.07168	0.08647	0.10314	0.14510	0.16808	0.17176	0.18039	0.19851	0.25011
1.75	0	0.05361	0.07263	0.08034	0.08610	0.10196	0.12882	0.13600	0.14735	0.15866	0.18897
ความลึกเฉลี่ย	0	0.04511	0.06245	0.07758	0.08580	0.10945	0.12621	0.13027	0.13715	0.15513	0.19451

ตารางที่ ข.25 ผลการทดสอบการสึกหรอของเฟืองเหล็กหล่อเบอร์ 30 ที่สภาวะ SR = 0.75 ความเร็วรอบ 1,000 รอบต่อนาที

ตำแหน่งจาก ยอดเฟือง (มม)	ความลึกของการสึกหรอ (มม) ที่จำนวนรอบ										
	0	500,000	1,000,000	1,500,000	2,000,000	2,500,000	3,000,000	3,500,000	4,000,000	4,500,000	5,000,000
0.25	0	0.03294	0.05563	0.07258	0.07570	0.09412	0.10310	0.10617	0.11154	0.13431	0.17052
0.75	0	0.02924	0.04715	0.06723	0.07426	0.09168	0.09947	0.10161	0.10360	0.12224	0.15968
1.25	0	0.06137	0.06982	0.08423	0.10047	0.14134	0.15430	0.16732	0.17572	0.19337	0.24364
1.75	0	0.05223	0.07075	0.07826	0.08387	0.09932	0.12549	0.13248	0.14354	0.15456	0.18408
ความลึกเฉลี่ย	0	0.04395	0.06084	0.07557	0.08358	0.10662	0.12059	0.12689	0.13360	0.15112	0.18948

ตารางที่ ข.26 ผลการทดสอบการสึกหรอของเฟืองเหล็กหล่อเบอร์ 30 ที่สภาวะ SR = 0.75 ความเร็วรอบ 1,500 รอบต่อนาที

ตำแหน่งจาก ยอดเฟือง (มม)	ความลึกของการสึกหรอ (มม) ที่จำนวนรอบ										
	0	500,000	1,000,000	1,500,000	2,000,000	2,500,000	3,000,000	3,500,000	4,000,000	4,500,000	5,000,000
0.25	0	0.03455	0.05834	0.07611	0.07939	0.09871	0.10812	0.11134	0.11698	0.14085	0.17883
0.75	0	0.03066	0.04944	0.07051	0.07788	0.09614	0.10432	0.10656	0.10864	0.12819	0.16745
1.25	0	0.06338	0.07311	0.08833	0.10536	0.14822	0.16715	0.17546	0.18428	0.20278	0.25550
1.75	0	0.05477	0.07419	0.08207	0.08796	0.10416	0.13160	0.13893	0.15053	0.16208	0.19304
ความลึกเฉลี่ย	0	0.04584	0.06377	0.07925	0.08765	0.11181	0.12780	0.13307	0.14011	0.15848	0.19871

ตารางที่ ข.27 ผลการทดสอบการสึกหรอของเฟืองเหล็กหล่อเบอร์ 30 ที่สภาวะ SR = 0.75 ความเร็วรอบ 2,000 รอบต่อนาที

ตำแหน่งจาก ยอดเฟือง (มม)	ความลึกของการสึกหรอ (มม) ที่จำนวนรอบ										
	0	500,000	1,000,000	1,500,000	2,000,000	2,500,000	3,000,000	3,500,000	4,000,000	4,500,000	5,000,000
0.25	0	0.04312	0.07282	0.09500	0.09909	0.12320	0.13495	0.13897	0.14600	0.17580	0.22320
0.75	0	0.03827	0.06171	0.08800	0.09720	0.12000	0.13020	0.13300	0.13560	0.16000	0.20900
1.25	0	0.08033	0.09139	0.11025	0.13150	0.18500	0.21430	0.21900	0.23000	0.25310	0.31890
1.75	0	0.06836	0.09260	0.10243	0.10978	0.13000	0.16425	0.17340	0.18788	0.20230	0.24094
ความลึกเฉลี่ย	0	0.05752	0.07963	0.09892	0.10939	0.13955	0.16093	0.16609	0.17487	0.19780	0.24801

ตารางที่ ข.28 เปอร์เซ็นต์การสึกหรอของโพลีเอทิลีนในรูปตัวแปร  $\alpha$  และ  $N^*$

$\alpha$	$N^*$										
	0	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0	4.5	5.0
0.25	0	1.72245	2.29881	2.52099	2.66776	2.77579	2.87465	2.96893	3.02906	3.07849	3.10397
0.31	0	1.85749	2.47869	2.71821	2.87669	2.99339	3.09990	3.20182	3.26603	3.31953	3.34705
0.35	0	2.07509	2.76968	3.03722	3.21405	3.34450	3.46375	3.57739	3.64925	3.70887	3.73995
0.50	0	2.10057	2.80331	3.07391	3.25329	3.38527	3.50554	3.62071	3.69562	3.75320	3.77257
0.61	0	2.27842	3.04078	3.33482	3.52898	3.67218	3.80264	3.92749	4.01514	4.07221	4.10636
0.71	0	2.61883	3.49535	3.83270	4.05642	4.22102	4.37084	4.51455	4.60780	4.68068	4.71992
0.75	0	2.38085	3.17787	3.48464	3.68747	3.83729	3.97386	4.10432	4.18687	4.24548	4.26688
0.92	0	2.63106	3.51114	3.85054	4.07476	4.23987	4.39071	4.53493	4.62666	4.69698	4.72450
1.06	0	2.97606	3.97233	4.35555	4.60933	4.79636	4.96707	5.13014	5.23359	5.31920	5.36354

ตารางที่ ข.29 เปอร์เซ็นต์การสึกหรอของโพลีเอไมด์ในรูปตัวแปร  $\alpha$  และ  $N^*$

$\alpha$	$N^*$										
	0	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0	4.5	5.0
0.25	0	0.55750	0.69917	0.74402	0.76797	0.77663	0.78376	0.78835	0.79905	0.80160	0.80415
0.31	0	0.68949	0.87193	0.92289	0.94786	0.96009	0.96875	0.97461	0.98760	0.98964	0.99372
0.35	0	0.80670	1.01410	1.06914	1.09462	1.10583	1.13386	1.14150	1.14966	1.14813	1.15322
0.50	0	0.61916	0.77765	0.82861	0.85256	0.86326	0.87040	0.87549	0.88670	0.88874	0.89231
0.61	0	0.72006	0.90454	0.96314	0.99117	1.00340	1.01207	1.01818	1.03143	1.03449	1.03907
0.71	0	0.84696	1.06404	1.13335	1.16596	1.18074	1.19043	1.19807	1.20673	1.21692	1.22253
0.75	0	0.74504	0.93614	0.99219	1.01767	1.03551	1.04723	1.05385	1.06150	1.06404	1.06608
0.92	0	0.82046	1.03041	1.09207	1.12061	1.13998	1.15322	1.16036	1.16800	1.17157	1.17412
1.06	0	0.93002	1.16851	1.23833	1.27043	1.29235	1.30712	1.31528	1.32496	1.33515	1.33974

ตารางที่ ข.30 เปอร์เซ็นต์การสึกหรอของเหล็กหล่อเบอร์ 30 ในรูปตัวแปร  $\alpha$  และ  $N^*$

$\alpha$	$N^*$										
	0	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0	4.5	5.0
0.25	0	1.56753	2.17039	2.69578	2.98422	3.80314	4.31315	4.52678	4.76578	5.39055	6.75872
0.31	0	1.66843	2.31104	2.87109	3.17532	4.05045	4.64322	4.82031	5.07562	5.74115	7.19810
0.35	0	1.86004	2.57756	3.20335	3.54172	4.51811	5.21015	5.37730	5.66166	6.40363	8.02895
0.50	0	1.74181	2.41143	2.99543	3.31240	4.22560	4.79228	5.02924	5.29525	5.98933	7.50947
0.61	0	1.91915	2.65654	3.30017	3.64925	4.65571	5.33704	5.54088	5.83390	6.59881	8.27387
0.71	0	2.29881	3.18245	3.95348	4.37237	5.57757	6.43166	6.63856	6.98916	7.90542	9.91223
0.75	0	2.23969	3.10041	3.85105	4.25924	5.43336	6.14527	6.46631	6.80826	7.70108	9.65590
0.92	0	2.33601	3.24972	4.03858	4.46664	5.69784	6.51269	6.78125	7.14001	8.07614	10.12626
1.06	0	2.93122	4.05794	5.04096	5.57451	7.11147	8.20099	8.46395	8.91138	10.07989	12.63859



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สมการแสดงการสึกหรอของเฟืองตรงโดยวิธีถดถอยกำลังสองน้อยที่สุด

$$D = aN^5 + bN^4 + cN^3 + dN^2 + eN + f$$

โดยที่ a, b, c, d, e, f คือค่าสัมประสิทธิ์ในสมการของแต่ละวัสดุดังตาราง ค.1 ถึง ค.3

ตารางที่ ค.1 ค่าสัมประสิทธิ์ a, b, c, d, e, f ของสมการการสึกหรอของโพลีเอทิลีน

$\alpha$	สัมประสิทธิ์					
	a	b	c	d	e	f
0.25	0.0157	-0.2376	1.3554	-3.6451	4.8321	0.0143
0.31	0.017	-0.2564	1.4625	-3.932	5.2111	0.0154
0.35	0.019	-0.2865	1.634	-4.3931	5.8223	0.0172
0.50	0.019	-0.288	1.6471	-4.437	5.8887	0.0176
0.61	0.0208	-0.314	1.7928	-4.8228	6.3931	0.0188
0.71	0.0239	-0.3613	2.0615	-5.5434	7.3475	0.0217
0.75	0.0217	-0.3282	1.874	-5.0406	6.6809	0.0196
0.92	0.0239	-0.3621	2.0679	-5.5649	7.3796	0.0219
1.06	0.0272	-0.4107	2.343	-6.3001	8.3501	0.0246

ตารางที่ ค.2 ค่าสัมประสิทธิ์ a, b, c, d, e, f ของสมการการสึกหรอของโพลีเอไมด์

$\alpha$	สัมประสิทธิ์					
	a	b	c	d	e	f
0.25	0.0056	-0.0837	0.4737	-1.2565	1.5729	0.0069
0.31	0.0069	-0.1043	0.5909	-1.5681	1.9595	0.0077
0.35	0.0088	-0.1311	0.7321	-1.9048	2.3245	0.0083
0.50	0.0062	-0.093	0.5262	-1.3964	1.7489	0.0075
0.61	0.0072	-0.1082	0.6125	-1.6253	2.0347	0.0087
0.71	0.0085	-0.1275	0.7205	-1.9105	2.3921	0.0103
0.75	0.0078	-0.1164	0.6534	-1.7155	2.1221	0.0086
0.92	0.0086	-0.1284	0.7202	-1.8897	2.3366	0.0095
1.06	0.0097	-0.1443	0.8111	-2.1338	2.6448	0.0109

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค.3 ค่าสัมประสิทธิ์ a, b, c, d, e, f ของสมการการศึกษหรือของเหล็กหล่อเบอร์ 30

$\alpha$	สัมประสิทธิ์					
	a	b	c	d	e	f
0.25	0.0379	-0.464	2.0708	-4.1534	4.694	0.0074
0.31	0.0413	-0.5061	2.251	-4.4874	5.0253	0.0074
0.35	0.0467	-0.5715	2.5372	-5.0414	5.6198	0.008
0.50	0.0421	-0.5164	2.3048	-4.6222	5.2195	0.0082
0.61	0.0476	-0.5826	2.5917	-5.1662	5.7815	0.0086
0.71	0.0578	-0.7069	3.1387	-6.2362	6.9456	0.0101
0.75	0.0538	-0.6601	2.9484	-5.9217	6.7019	0.0107
0.92	0.0574	-0.703	3.1282	-6.2453	7.0293	0.0097
1.06	0.0737	-0.9014	4.0025	-7.9525	8.8568	0.0128



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ง.1 ความหยาบผิวของโพลีเอทิลีน (หน่วย : ไมครอน)

ค่าความหยาบผิว	ค่าความหยาบ ตอนเริ่มต้น	หลังจากทดสอบ 5 ล้านรอบ		
		อัตราส่วนความเค้น		
		0.25	0.5	0.75
Ra	0.28	0.2	0.2	0.29
Rmax	3.78	3.4	4	2.89

ตารางที่ ง.2 ความหยาบผิวของโพลีเอไมด์ (หน่วย : ไมครอน)

ค่าความหยาบผิว	ค่าความหยาบ ตอนเริ่มต้น	หลังจากทดสอบ 5 ล้านรอบ		
		อัตราส่วนความเค้น		
		0.25	0.5	0.75
Ra	0.33	0.2	0.16	0.14
Rmax	4.38	1.2	2.02	2.19

ตารางที่ ง.3 ความหยาบผิวของเหล็กหล่อเบอร์ 30 (หน่วย : ไมครอน)

ค่าความหยาบผิว	ค่าความหยาบ ตอนเริ่มต้น	หลังจากทดสอบ 5 ล้านรอบ		
		อัตราส่วนความเค้น		
		0.25	0.5	0.75
Ra	0.2	1.1	1.4	2.9
Rmax	4.5	12.4	29	49.2

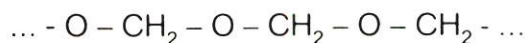
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก จ  
คุณสมบัติของโพลีเอไมด์ โพลีอีพอกซีเมทิลีนและเหล็กหล่อ  
เบอร์30



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

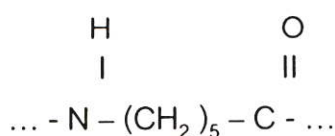
โพลีออกซีเมทิลีนมีชื่อเรียกทางการค้าว่า POM และชื่อเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า โพลีอะซิโธล (Polyacetal) มีสูตรโครงสร้างทางเคมีดังรูป จ.1 POM เป็นเทอร์โมพลาสติก (Thermoplastic) ซึ่ง



**รูปที่ จ.1** สูตรโครงสร้างทางเคมีของโพลีออกซีเมทิลีน

มีความหนาแน่นประมาณ 1.41 ถึง 1.42 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร มีความเหนียวมาก มีค่าความต้านทานแรงดึงประมาณ 70 เมกกะพาสคาลสามารถผลิตด้วยการฉีดในแม่พิมพ์ ปาดผิว และ เชื่อมประสานได้ [13] เนื่องจาก POM เป็นโพลีเมอร์จากกลุ่มของฟอร์มัลดีไฮด์ (Formaldehyde) จึงเป็นพลาสติกที่ค่อนข้างมีความแข็งแรงสูง และมีคุณสมบัติด้านการต้านทานความเสียหายจากความล้าตึงเครียด มีความเสถียรทางด้านรูปร่างสูง สัมประสิทธิ์ความเสียดทานต่ำ ต้านทานต่อสารละลายและความร้อนได้ดี สามารถใช้งานได้ถึงอุณหภูมิ 104 °C POM สามารถอยู่ได้ทั้งในรูป homopolymer และ copolymer โดยในรูป homopolymer นั้นจะมีความแข็งแรงกว่ารูป copolymer แต่อาจไม่เสถียรในระหว่างกระบวนการผลิต POM มีโครงสร้างที่ค่อนข้างมีความเป็นสัณฐานสูง (highly crystalline) ทำให้มีคุณสมบัติด้านการต้านทานการคืบ (Creep) ในระยะยาวได้ดีมาก แต่คุณสมบัติอื่นๆอาจลดลงเมื่อต้องรับภาระกรรมเป็นระยะเวลานาน (Long term loading) POM สามารถนำไปใช้แทนชิ้นส่วนที่เป็นโลหะที่ไม่ต้องการความแข็งแรงมากนัก หรือนำไปใช้เป็นชิ้นส่วนเช่น เฟือง ตลับลูกปืน โรลเลอร์ โซ่สายพานของคอนเวเยอร์ เรือนปั๊ม และ ชิ้นส่วนปั๊ม เป็นต้น [14]

โพลีเอไมด์มีชื่อเรียกทางการค้าว่า PA มีสูตรโครงสร้างทางเคมีดังรูป จ.2 มีความหนาแน่นประมาณ 1.02 ถึง 1.21 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร มีค่าความต้านทานแรงดึงประมาณ 70 เมกกะพาสคาล มีความลื่นและซึมซับการสั่นสะเทือนได้ดี ทนทานต่อสารละลายส่วนใหญ่ได้ รักษารูปทรงได้ถึงอุณหภูมิ 100 °C และทนความร้อนแบบชั่วคราวได้ถึง 190 °C อุณหภูมิที่ใช้ขึ้นรูปต้องมากกว่า 220 °C สามารถผลิตได้ด้วยการหล่อในแม่พิมพ์ ดัดขาว เชื่อมประสานและปาดผิวได้ [1]



**รูปที่ จ.2** สูตรโครงสร้างทางเคมีของโพลีเอไมด์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โพลีเอไมด์มีชื่อเรียกโดยทั่วไปว่า "ไนลอน" และมักถูกแบ่งประเภทตามจำนวนอะตอมของคาร์บอนในโมโนเมอร์ เช่น ไนลอน 6, ไนลอน 6/6 เป็นต้น โพลีเอไมด์ที่มีโครงสร้างแบบสัณฐานจะมีความต้านทานแรงดึง แรงกระแทก และการขีดสีสูง โพลีเอไมด์สามารถต้านทานสารละลายที่ไม่มีขั้วได้เช่น อะโรเมติกไฮโดรคาร์บอน เอสเทอร์ และน้ำมัน เป็นต้น แต่โพลีเอไมด์จะอ่อนตัวและซึมสารละลายที่มีขั้วเช่น น้ำ แอลกอฮอล์ และไกลคอล เป็นต้น [14] โพลีเอไมด์สามารถนำไปใช้ทำเป็นชิ้นส่วนเช่น เฟือง ร่องเพลลา บูชร่องเพลลา รางเลื่อน ลูกกลิ้ง พูลเลย์ โซ และสิ่งทอ เป็นต้น [1]

เหล็กหล่อเบอร์ 30 เป็นเป็นเหล็กหล่อสีเทา (Grey cast iron) ซึ่งมีปริมาณธาตุองค์ประกอบโดยปกติดังตาราง จ.1 [15] มีสัญลักษณ์โดยย่อ GG มีความหนาแน่นประมาณ 7,300 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร มีความต้านทานแรงดึงมากกว่า 30 กิโลปอนด์ต่อตารางนิ้ว หรือ 207 เมกกะพาสคาล ความต้านทานแรงกดสูงกว่าความต้านทานแรงดึงประมาณ 4 เท่า [9] คือ ประมาณ 751 เมกกะพาสคาล เนื่องจากมีกราไฟต์ในโครงสร้างจึงทำให้ค่าโมดูลัสของความยืด

ตารางที่ จ.1 ปริมาณธาตุองค์ประกอบของเหล็กหล่อสีเทา

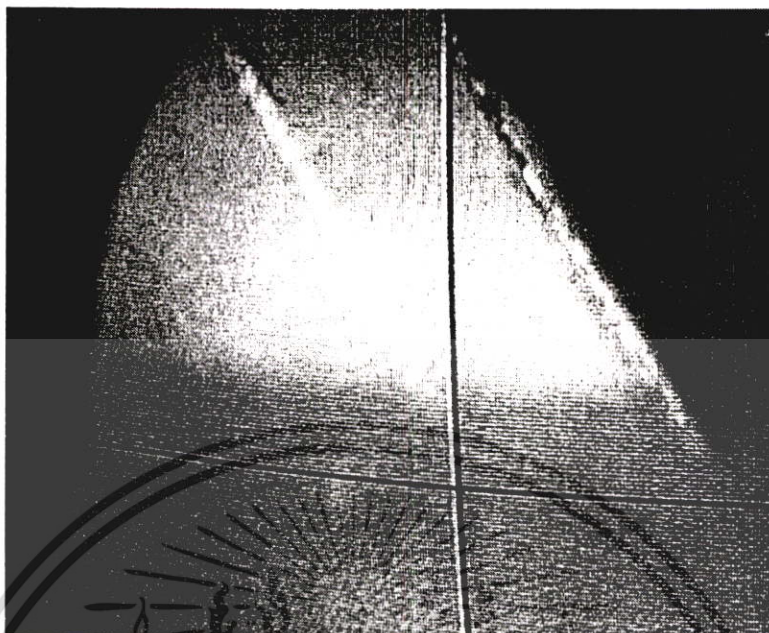
C	Mn	Si	Cr	Ni	Mo	Cu	P	S
3.25 - 3.5	0.5 - 0.9	1.8 - 2.3	0.05 - 0.45	0.05 - 0.2	0.05 - 0.1	0.15 - 0.4	0.12 max	0.15 max

หยุ่นต่ำกว่าเหล็กกล้า [13] คือมีค่าประมาณ 13 – 16.4 เมกกะปอนด์ต่อตารางนิ้วหรือ 90 – 113 กิกะพาสคาล มีค่าความแข็งแบบบริเนลประมาณ 201 [9] โดยทั่วไปแล้วเหล็กหล่อมักคุณสมบัติดูดกลืนแรงได้ดีและมีกราไฟต์เป็นธาตุที่ทำหน้าที่คล้ายสารหล่อลื่นในตัว จึงทำให้ผิวที่ได้จากการปาดลื่นดี มีเศษชิ้นงานสั้น มักนิยมนำไปทำเป็นบูชร่องเพลลา รับการหมุน ทำรางร่องเลื่อนของเครื่องจักร ฝาสูบเครื่องยนต์สันดาปภายใน ชิ้นส่วนที่รับแรงอัด เป็นต้น [13]



ภาคผนวก จ  
ภาพการศึกษหอรของเฟืองเมื่อทดสอบครบ 5 ล้านรอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

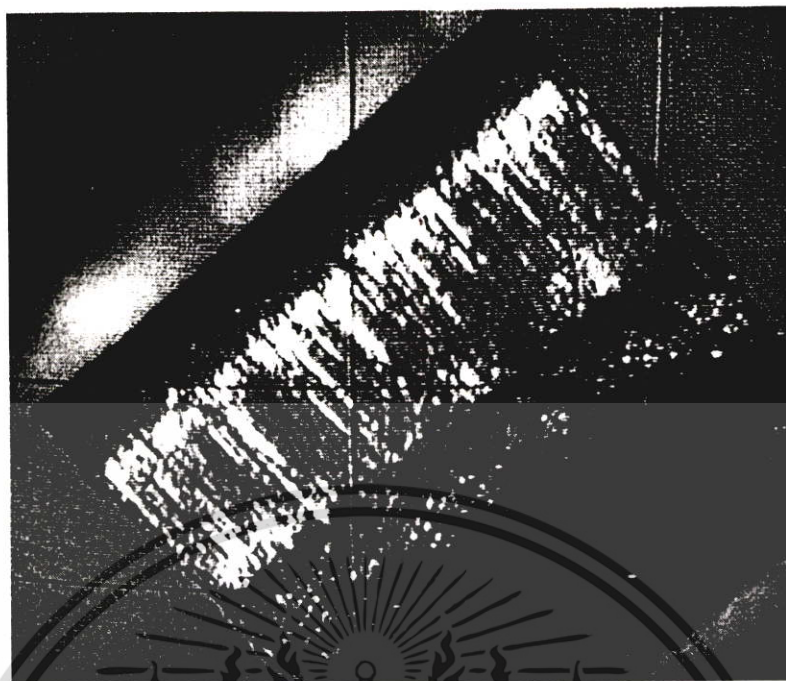


รูปที่ จ.1 ลักษณะรอยสีกรอของเฟืองอีอกซิเมทิลีน (กำลังขยาย 15 เท่า)



รูปที่ จ.2 ลักษณะรอยสีกรอของเฟืองโพลีเอไมด์ (กำลังขยาย 15 เท่า)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ จ.3 ลักษณะรอยสี่เหลี่ยมของเฟืองเหล็กหล่อเบอร์ 30 (กำลังขยาย 15 เท่า)

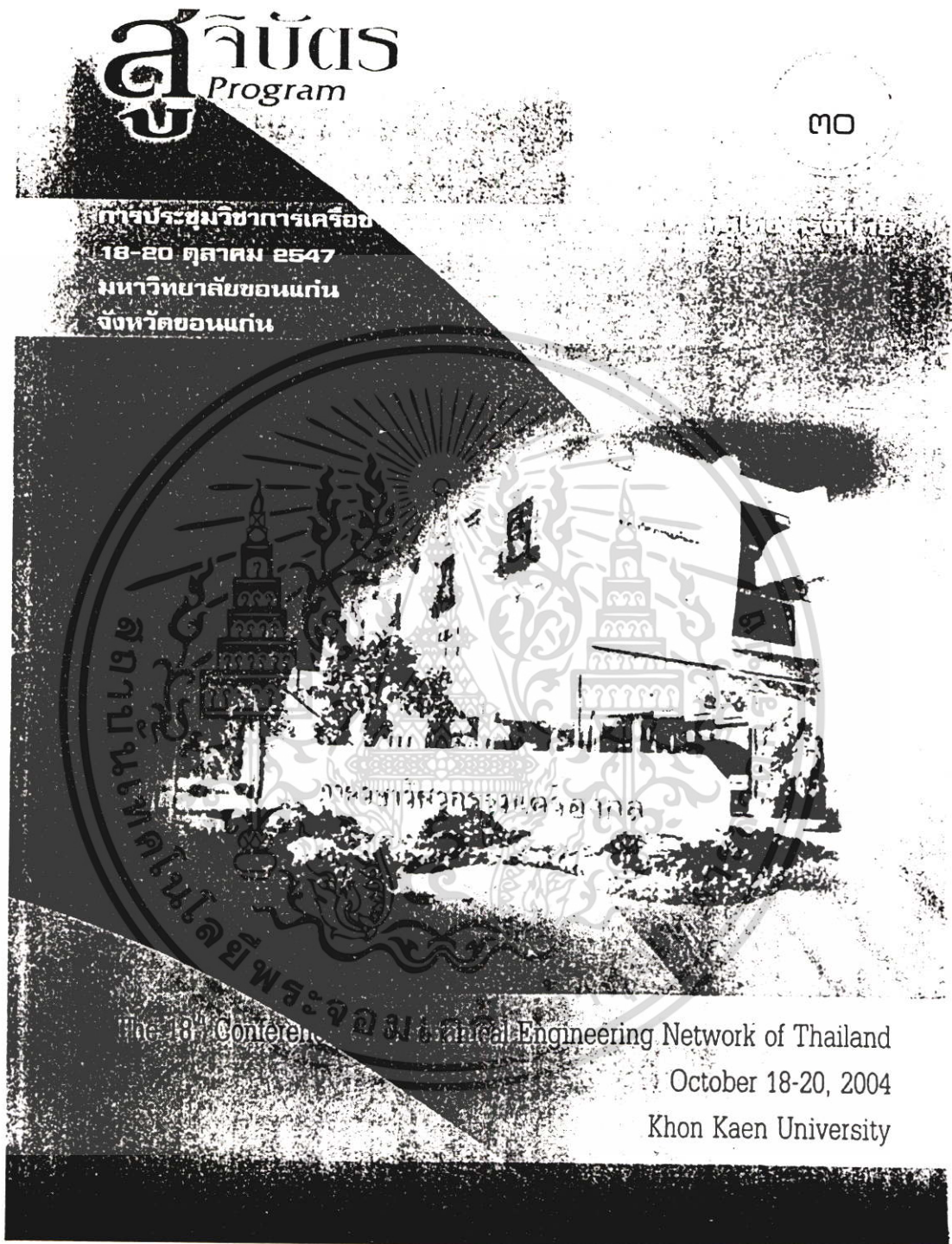
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก ช

ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ๑.1 สื่อบัตรการประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 18

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

AMM042

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 18  
18-20 ตุลาคม 2547 จังหวัดขอนแก่น

135

การศึกษาผลของรอยบากที่มีต่ออายุของชิ้นส่วนรับแรงตามแนวแกนที่ทำจากวัสดุ  
เอไอเอสไอ 4140 อลูมิเนียม 7075 และ โพลีเอไมด์ 6

อาณัติ หาทวีทธิ มงคล มงคลวงศ์โรจน์

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ถ.ฉลองกรุง เขตลาดกระบัง กรุงเทพฯ 10520

E-mail: anat@iistr.or.th; kmmoroko@kmitl.ac.th2

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการศึกษาเปรียบเทียบผลกระบวนของรอยบากที่มีต่ออายุของชิ้นส่วนรับแรงตามแนวแกนที่ทำจากวัสดุ กลุ่มคือ เอไอเอสไอ 4140 อลูมิเนียม 7075 และ โพลีเอไมด์ 6 โดยทำการทดลองเตรียมชิ้นทดสอบจากวัสดุดังกล่าวให้มีค่าพารามิเตอร์ความเค้นสะสมต่างกันคือ 1.2, 1.6, 2.0, 4.0 และ 6.0 โดยใช้ระเบียบวิธีไฟโบรค อธิเมตในการออกแบบรูปร่างของชิ้นทดสอบ แล้วเปรียบเทียบผลการคำนวณอายุการรับแรงตามแนวแกนโดยสมการ "อายุความเครียด" และสมการ "บาสควิน" กับอายุที่ได้จากการทดสอบการรับแรงจริง ผลที่ได้สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการประเมินอายุของชิ้นส่วนวิศวกรรมที่ทำงานในกลุ่มวัสดุดังกล่าวได้



ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์  
มหาวิทยาลัยขอนแก่น

รูปที่ ๒.2 บทคัดย่อบทความที่ได้รับการตีพิมพ์ในการประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกล  
แห่งประเทศไทย ครั้งที่ 18

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่ 18  
18-20 ตุลาคม 2547 จังหวัดขอนแก่น

## การศึกษาผลของรอยบากที่มีต่ออายุของชิ้นส่วนรับแรงตามแนวแกนที่ทำจากวัสดุ เอไอเอสไอ 4140 อลูมิเนียม 7075 และ โพลีเอไมด์ 6

The Study of Notch's Effect on Life Cycles under Axial Load for Material

AISI 4140, Aluminum 7075 and Polyamide 6

อานัติ ทาทวิทย์<sup>1</sup> มงคล มงคลวงโรจน์<sup>2</sup>

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ถ.ฉลองกรุง เขตลาดกระบัง กรุงเทพฯ 10520

Anat Hasap<sup>1</sup> Mongkol Mongkolwongrojn<sup>2</sup>

Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut Institute of Technology Ladkrabang,

Ladkrabang 10520, Thailand

E-mail: anat@kmitl.ac.th

: kmmongko@kmitl.ac.th2

### บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการศึกษาเปรียบเทียบผลกระทบบนของรอยบากที่มีต่ออายุของชิ้นส่วนรับแรงตามแนวแกนที่ทำจากวัสดุ 3 กลุ่มคือ เอไอเอสไอ 4140 อลูมิเนียม 7075 และ โพลีเอไมด์ 6 โดยทำการทดลองเตรียมชิ้นทดสอบจากวัสดุดังกล่าวให้มีค่าแฟคเตอร์ความเค้นสะสมต่างกันคือ 1.2, 1.6, 2.0, 4.0 และ 6.0 โดยใช้วิธีเบี่ยงวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ในการออกแบบรูปร่างของชิ้นทดสอบ แล้วเปรียบเทียบผลการคำนวณอายุการรับแรงตามแนวแกนโดยสมการ "อายุความเครียด" และสมการ "บาดควิน" กับอายุที่ได้จากการทดสอบการรับแรงจริง ผลที่ได้สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการประเมินอายุของชิ้นส่วนวิศวกรรมที่ทำจากวัสดุดังกล่าวได้

### Abstract

This paper presents the comparative study of notch's effect on the life cycles under axial loading of material AISI 4140, Aluminum 7075 and Polyamide 6. The experiment setup using specimens prepared from the AISI 4140, Aluminum 7075 and Polyamide 6 with varying stress concentration factor of 1.2, 1.6, 2.0, 4.0 and 6.0 respectively. The dimension of the specimens was determined using the Finite Element Method. The predicted life cycle under axial loading using the strain life equation and Basquin equation were compared with the life cycle from the test. The result from this experiment could be used for service life prediction of engineering components made of these materials.

### 1. บทนำ

ชิ้นส่วนประกอบทางวิศวกรรมสมัยใหม่โดยส่วนใหญ่จะรับภาระกรรมแบบแปรเปลี่ยนอยู่ตลอดเวลา การออกแบบเพื่อให้สามารถทนทานต่อภาระกรรมที่ไม่คงที่นี้ได้นั้นได้ตลอดอายุการใช้งานจึงจำเป็นต้องคำนึงถึงผลของความล้าซึ่งอาจเกิดขึ้นได้เมื่อวัสดุต้องรับภาระกรรมซ้ำ ๆ กันหลาย ๆ ครั้ง ซึ่งวัสดุแต่ละชนิดก็จะมีคุณลักษณะทนทานต่อความล้าแตกต่างกันไป กลไกของกาเกิดความเสียหายเนื่องจากความล้านี้มีลักษณะแบบสะสมตลอดระยะเวลาที่ชิ้นส่วนนั้นรับภาระกรรม [1] จนกระทั่งชิ้นส่วนนั้นถึงจุดที่ไม่สามารถรับภาระกรรมอีกต่อไปได้ก็จะเกิดความเสียหายเนื่องจากความล้า ซึ่งเป็นความเสียหายที่อาจเกิดขึ้นอย่างฉับพลันโดยไม่มีอาการบอเหตุหรือเตือนภัยล่วงหน้าเช่น การยืดตัว (Yielding) เป็นต้น และอาจก่อให้เกิดความเสียหายอย่างมากต่อทั้งชีวิตและทรัพย์สินหากเกิดขึ้นกับชิ้นส่วนของอุปกรณ์ที่เกี่ยวข้องกับความปลอดภัย เช่น เครื่องบิน สะพาน โครงสร้างอาคาร รถยนต์ เป็นต้น

ในบรรดาปัจจัย (factor) ที่มีผลกระทบต่อความเสียหายเนื่องจากความล้า รอยบาก (Notch) เป็นปัจจัยที่มีผลค่อนข้างมากแล้วแต่ระดับความรุนแรงของรอยบากซึ่งเป็นผลมาจากการออกแบบและกรรมวิธีการผลิตชิ้นส่วน รอยบากเป็นสิ่งที่หลีกเลี่ยงได้ยากในการออกแบบและผลิตชิ้นส่วนวิศวกรรม จากการศึกษาพบว่าความเสียหายเนื่องจากความล้าจะเกิดขึ้นตรงบริเวณที่เป็นรอยบากเนื่องจากเป็นบริเวณที่มีความเค้นสะสม (Stress concentration) สูงซึ่งรอยแตกเนื่องจากความล้า (Fatigue crack) จะเกิดขึ้นบริเวณนี้ ดังนั้นอายุการใช้งานของชิ้นส่วนวิศวกรรมจึงได้รับผลกระทบโดยตรงจากรอยบาก

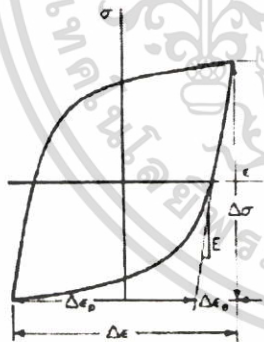
ในบทความนี้ได้ศึกษาผลกระทบของรอยบากที่มีต่ออายุของชิ้นส่วนรับแรงตามแนวแกนโดยจะเปรียบเทียบให้เห็นถึงผลของรอยบากที่มีต่ออายุการใช้งานของชิ้นส่วนและความถูกต้องของการประเมิน

อายุของชิ้นส่วนโดยวิธี Strain based approach และยังคงศึกษาผลการใช้ค่าแฟกเตอร์ความเค้นสะสม (Stress concentration factor) และค่าแฟกเตอร์ลดความแข็งแรงต่อความล้า (Fatigue strength reduction factor) ในการประเมินอายุของชิ้นส่วนที่รับแรงแบบพลวัตร ทั้งนี้ได้เลือกทำการศึกษาวัด 3 ชนิดคือ เหล็กที่ใช้ท่อไฮส AISI 4140 อลูมิเนียม 7075 และ โพลีเอไมด์ 6 เหล็กท่อไฮส AISI 4140 หรือ SCM440 ตามมาตรฐาน JIS ซึ่งมีชื่อเรียกทางการค้าว่า "เหล็กหัวฟ้า" ซึ่งเป็นเหล็กกล้าผสมคาร์บอนปานกลาง 0.38 ถึง 0.43 % เหล็กชนิดนี้มีความสามารถในการชุบแข็ง ความแข็งหลังชุบประมาณ 54 - 59 HRC สามารถชุบขึ้นรูปได้ดี และสามารถทนการกัดแผลงปานกลาง ความสามารถในการเชื่อมไม่ติดนักเนื่องจากมีโอกาสแตกที่วาระเชื่อมได้ง่าย ส่วนใหญ่นำไปใช้ในการทำเฟืองขนาดเล็ก สลักเกลียว ชิ้นส่วนเครื่องจักรกล และสลักเกลียวต่างๆ ที่ต้องการความแข็งแรงสูง เป็นต้น [2] อลูมิเนียม 7075 เป็นอัลลอยด์ที่มีความแข็งแรงสูงใช้ในชิ้นส่วนเครื่องจักร โครงสร้างและเครื่องบิน ส่วนโพลีเอไมด์ 6 เป็นเทอร์โมพลาสติกที่มีความต้านทานแรงดึง แรงกระแทก และโมดูลัสสูง มีคุณสมบัติต้านทานการรั่วซึมได้ดี ใช้ทำเพื่องู๊ช ลูกกลิ้ง เป็นต้น

2. ทฤษฎี

2.1 พฤติกรรมการตอบสนองต่อการกระทำแบบซ้ำ ๆ ของวัสดุ

เมื่อวัสดุรับภาระกรรมแบบซ้ำ ๆ (Repeated load) หลายๆ ครั้ง หรือภาระกรรมแบบไม่คงที่ (Variable load) อยู่ตลอดเวลาอาจทำให้ชิ้นส่วนเกิดการล้าตัวจนเกิดความเสียหายเนื่องจากความล้าได้แม้ว่าชิ้นส่วนนั้นจะรับภาระกรรมในช่วงยืดหยุ่น(Elastic) หรือต่ำกว่าจุดจำนน (Yielding point) ก็ตาม กลไกความเสียหายเนื่องจากความล้าสามารถแบ่งได้เป็น 3 ระยะ [2,3] คือ 1) ระยะเริ่มเกิดรอยแตก (Crack initiation) 2) ระยะที่รอยแตกขยายตัว (Crack propagation) 3) ระยะที่เกิดความเสียหายขั้นสุดท้าย (Final failure) เมื่อวัสดุรับภาระกรรมแบบพลวัตร ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของวัสดุจะมีลักษณะเป็นวงรอบ (Loop) ซ้ำ ๆ กันที่เรียกว่า Hysteresis loop ดังรูปที่ 1 [3]



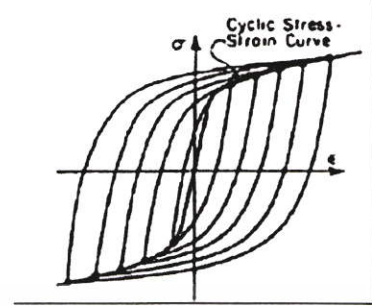
รูปที่ 1 Hysteresis loop

สมการ Hysteresis equation :

$$\Delta \epsilon = \Delta \sigma / E + 2(\Delta \sigma / 2K)^{1/n'} \quad (1)$$

โดยที่ K' คือ Cyclic strength coefficient n' คือ Cyclic strain hardening exponent Δσ คือ Total stress range Δε คือ Total strain range เมื่อนำ Hysteresis loop หลาย loop มา plot บนกราฟ

เดียวกันและเชื่อมต่อกันปลายเข้าด้วยกันก็จะได้ Cyclic stress-strain curve ดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 Cyclic stress-strain curve

สมการ Cyclic stress strain curve :

$$\epsilon_r = \sigma / E + (\sigma / K)^{1/n'} \quad (2)$$

โดยที่ K' คือ Cyclic strength coefficient  $K' = \sigma_r / \epsilon_r^{n'}$

n' คือ Cyclic strain hardening exponent ( $n' = b/c$ )

2.2 การคำนวณหา Local stress และ Local strain

เมื่อชิ้นส่วนรับภาระกรรม บริเวณที่มีความเค้นสูงสุดจะเป็นจุดวิกฤตของชิ้นส่วนนั้น กล่าวคือความเค้นและความเครียดตรงบริเวณดังกล่าวจะนำมาใช้ในการประเมินอายุของชิ้นส่วน โดยส่วนใหญ่แล้วจุดวิกฤตจะอยู่ตรงบริเวณที่มีความเค้นสะสม เช่นจุดที่มีการเปลี่ยนขนาด Fillet ดินรอยเชื่อม (Weld toe) ร่องลิ่ม เป็นต้นบริเวณเหล่านี้ถือว่าเป็นรอยบากและจะเป็นจุดที่เริ่มเกิดรอยแตกเนื่องจากความล้า ถึงแม้ชิ้นส่วนจะรับภาระกรรมไม่สูงนักแต่ตรงจุดที่เป็นรอยบากเหล่านี้อาจมีความเค้นอยู่ในช่วง Plastic ได้หากรอยบากมีค่าแฟกเตอร์ความเค้นสะสมสูง เทคนิคที่มักใช้ในการหาแฟกเตอร์ความเค้นสะสม ได้แก่ 1) Finite element 2) Strain gauge 3) Photo-elastic

Neuber ได้เสนอสมการที่สามารถนำไปใช้ในการประมาณค่าความเค้นและความเครียดตรงบริเวณที่เป็นรอยบาก [3]

$$K_t^2 = K_\epsilon K_\sigma \quad (3)$$

$$K_t^2 S_e = \sigma \epsilon \text{ หรือ } K_t^2 \Delta S \Delta \epsilon = \Delta \sigma \Delta \epsilon$$

โดยที่ K<sub>t</sub> คือ Theoretical stress concentration factor K<sub>ε</sub> คือ True strain concentration factor K<sub>σ</sub> คือ True stress concentration factor S คือ Nominal stress σ คือ Local (True) stress ε คือ Nominal strain E คือ Local (True) strain เมื่อรวมสมการ (3) กับสมการ (1) และ (2) จะได้

$$K_t^2 S_e = \sigma (\sigma / E + (\sigma / K)^{1/n'}) \quad (4)$$

$$\text{หรือ } K_t^2 \Delta S \Delta \epsilon = \Delta \sigma [\Delta \sigma / E + 2(\Delta \sigma / 2K)^{1/n'}] \quad (5)$$

2.3 การคำนวณค่าแฟคเตอร์ลดความแข็งแรงต่อความล้า

ถึงแม้ว่าบริเวณที่เป็นรอยบากจะทำให้ค่าความเค้นทางทฤษฎีเพิ่มขึ้นเนื่องจากผลแฟคเตอร์ความเค้นและสมกับคัม วัสดุบางชนิดหรือรูปร่างของรอยบากบางลักษณะก็ไม่ sensitive ต่อรอยบากทำให้ความเค้นที่เกิดขึ้นจริงต่ำกว่าความเค้นทางทฤษฎี หรืออีกนัยหนึ่งคือค่าแฟคเตอร์ความเค้นและสมสำหรับวัสดุบางชนิดหรือรูปร่างของรอยบากบางลักษณะต่ำกว่าแฟคเตอร์ความเค้นและสมทางทฤษฎี ในกรณีนี้จะใช้ค่าแฟคเตอร์ลดความแข็งแรงต่อความล้า (Fatigue strength reduction factor)  $K_f$  แทน [4]

$K_f = \sigma_{max} / \sigma_0$  โดย  $\sigma_0$  คือ nominal stress  
notch sensitivity factor :  $q = (K_f - 1) / (K_t - 1)$

โดยที่  $0 \leq K_f \leq K_t$  และ  $0 \leq q \leq 1$

สมการของ Peterson [5] :

$$q = 1 / (1 + a/r) \tag{6}$$

$$a = 0.0254 (2079 / S_{ut})^{1.9} \tag{7}$$

โดยที่  $a$  คือ ค่าคงที่ของวัสดุ  $S_{ut}$  คือ Ultimate tensile strength (MPa)  
 $r$  คือ รัศมีรอยบาก (mm)

2.4 การคำนวณอายุของชิ้นส่วนรับภาระกรรมแบบไม่คงที่

สมการของมัสคควิน ซึ่งมีรูปทั่วไปว่า

$$\sigma_a = a(N)^b \tag{8}$$

สำหรับวัสดุกลุ่มเหล็กสมการค่าคงที่  $a$  และ  $b$  หาได้จาก [4]

$$a = (0.9 S_{ut})^b / S_e$$

$$b = -(1/3) \log(0.9 S_{ut} / S_e)$$

$S_{ut}$  คือ Ultimate tensile strength  $S_e$  คือ Fatigue strength หาได้จาก

$$S_e = 0.504 S_{ut} \text{ สำหรับ } S_{ut} < 1400 \text{ MPa}$$

$$S_e = 1400 \text{ MPa สำหรับ } S_{ut} > 1400 \text{ MPa}$$

ในปัจจุบันทฤษฎีที่สามารถอธิบายลักษณะของความเสียหาย

เนื่องจากความล้าได้ดีคือ ทฤษฎีที่มีพื้นฐานบน Strain based approach ซึ่งสามารถใช้ในการประเมินอายุและความแข็งแรงต่อความล้าได้ด้วยวิธีนี้ได้รวมถึงผลของ Elastic strain และ Plastic strain สามารถใช้ได้กับทั้ง LCF และ HCF [1,4]

$$\Delta \epsilon / 2 = (\sigma_f / E) (2N_f)^b + \epsilon_f (2N_f)^c \tag{9}$$

โดยที่  $\sigma_f$  คือ Fatigue strength coefficient ;  $b$  คือ Fatigue strength exponent  $\epsilon_f$  คือ Fatigue ductility coefficient ;  $c$  คือ Fatigue ductility exponent ;  $N_f$  คือ จำนวนครั้งของการกลับทิศทางความเครียด (Reversal)  $N$  คือจำนวนรอบของการรับภาระกรรม =  $2 N_f$

2.5 เทคนิคการประมาณค่าคุณสมบัติด้านความล้าแบบแกนเดียว (uni-axial fatigue properties)

Uni-axial fatigue properties ได้แก่  $\sigma_f$ ,  $b$ ,  $\epsilon_f$  และ  $c$  เป็นค่าคงที่ของวัสดุ สามารถหาได้จากการทดลองและยังสามารถประมาณได้จากค่าที่ได้จากการทดสอบแรงดึงได้ด้วย เช่น ค่า Ultimate tensile strength  $S_{ut}$  , Young modulus  $E$ , Fracture ductility  $\epsilon_f$  และ % Reduction in area (RA) เป็นต้น วิธีการประมาณค่าเหล่านี้มีหลายวิธี และพบว่าวิธีที่ให้ผลการประมาณที่ดีที่สุดคือวิธี Modified universal slope ของ Muralidharan และ Manson [6]

$$\sigma_f = 0.623E(S_{ut} / E)^{c+2a}$$

$$b = -0.09$$

$$\epsilon_f = 0.0196E_f^{0.55} (S_{ut} / E)^{-0.53}$$

$$c = -0.56 \tag{10}$$

โดยที่  $E_f = \ln(1/(1-\%RA))$

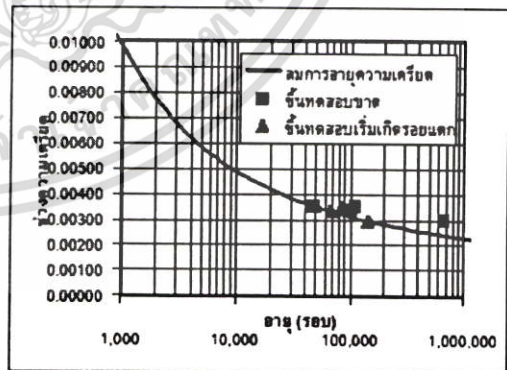
3. การทดลอง

เตรียมชิ้นทดสอบแรงดึงจากวัสดุ AISI 4140 อลูมิเนียม 7075 และ โพลีเอไมด์ 6 อย่างละ 3 ชิ้นให้มีขนาดตามมาตรฐาน ASTM E370 ทำการทดสอบความแข็งแรงและทดสอบแรงดึง นำข้อมูลจากการทดสอบไปใช้ในการเตรียมชิ้นทดสอบความล้าวัสดุละ 5 ชิ้น โดยออกแบบขนาดรอยบากให้มีค่า แฟคเตอร์ความเค้นและสมต่างกันตั้งแต่ค่าต่ำประมาณ 1.2 จนถึงค่าสูงประมาณ 6.0 โดยใช้โปรแกรม Finite Element ANSYS 7.0 จำลองการรับแรงในแนวแกนหาค่าแฟคเตอร์ความเค้นและสมที่รอยบากของชิ้นทดสอบ แล้วทดสอบความล้าชิ้นทดสอบทั้ง 5 ชิ้นด้วยขนาดแรงตามแนวแกนให้เกิดความเค้นสูงสุดที่รอยบากของชิ้นวัสดุ AISI 4140 เท่ากับ 650 MPa วัสดุอลูมิเนียม 7075 เท่ากับ 360 MPa และ วัสดุโพลีเอไมด์ 6 เท่ากับ 36 MPa โดยอัตราส่วนความเค้น (Stress ratio : R) เท่ากับ -1 สำหรับวัสดุ AISI 4140 และ อลูมิเนียม 7075 ใช้ความเร็วในการทดสอบในช่วง 20 - 30 Hz นับที่จำนวนรอบที่ชิ้นทดสอบเริ่มมีรอยแตกและจำนวนรอบที่ชิ้นทดสอบขาดแล้วเปรียบเทียบผลกับอายุที่ได้จากการคำนวณอายุโดยใช้สมการอายุความเครียดและสมการมัสคควิน ในการนี้ของวัสดุโพลีเอไมด์ 6 จะใช้ความเร็วในการทดสอบคงที่ 0.2 Hz และใช้การลดของค่า Stiffness 20 % เป็นเกณฑ์ในการหยุดทดสอบ

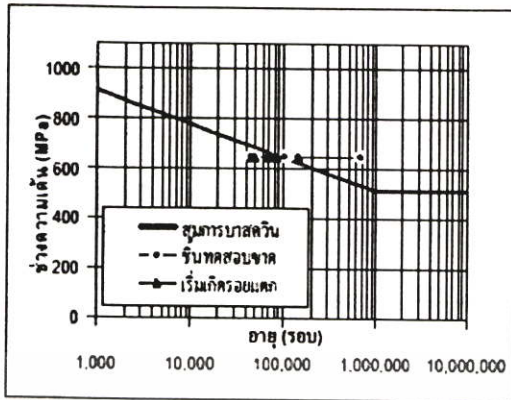
4. ผลการทดลองและวิเคราะห์ผล

4.1 จากกราฟรูปที่ 3 และ 4 พบว่าการใช้สมการความเครียด

ทำนายอายุของชิ้นทดสอบที่ทำจากวัสดุ AISI 4140 ได้ค่อนข้างแม่นยำและให้ค่าที่ปลอดภัย (Conservative) คืออายุที่คำนวณได้ต่ำกว่าอายุที่ได้จากการทดสอบ และทำนายอายุเมื่อเกิดรอยแตกได้ต่ำกว่าอายุเมื่อชิ้นงานขาดทั้งชิ้น ในขณะที่สมการมัสคควินทำนายอายุที่ค่อนข้างไม่ปลอดภัยที่แฟคเตอร์ความเค้นและสมต่าง แต่จะให้ค่าที่ปลอดภัยมากที่สุดที่แฟคเตอร์ความเค้นและสมสูงๆ

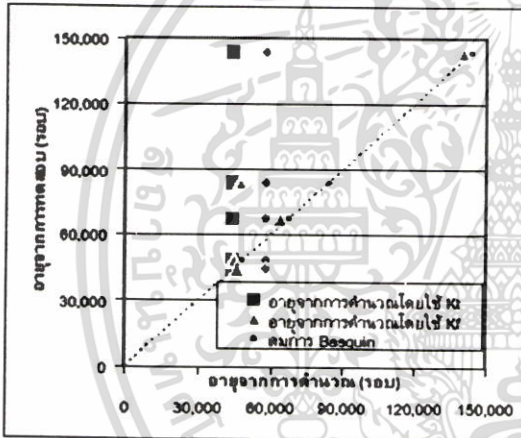


รูปที่ 3 กราฟเปรียบเทียบผลการทดสอบวัสดุ AISI 4140 กับสมการ อายุความเครียด

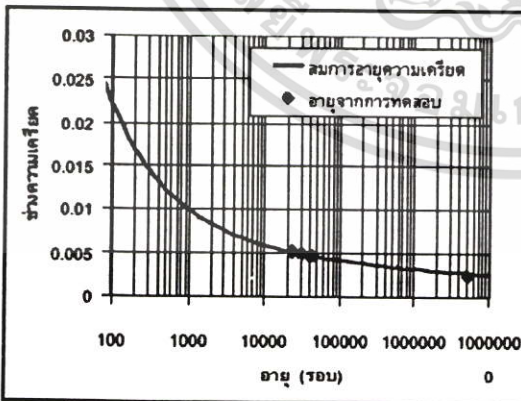


รูปที่ 4 กราฟเปรียบเทียบผลการทดสอบวัสดุ AISI 4140 กับ สมการบาสควิน

4.2 จากกราฟรูปที่ 5 พบว่าที่เฟดเตอร์ความเค้นสูงๆ การใช้ค่า  $K_t$  ในการคำนวณอายุโดยสมการความเครียดจะให้ผลที่ใกล้เคียงกับ ผลการทดสอบมากที่สุด ในขณะที่การใช้ค่า  $K_f$  จะให้ผลการคำนวณอายุที่ปลอดภัยมาก เช่นเดียวกับการคำนวณโดยใช้สมการบาสควิน

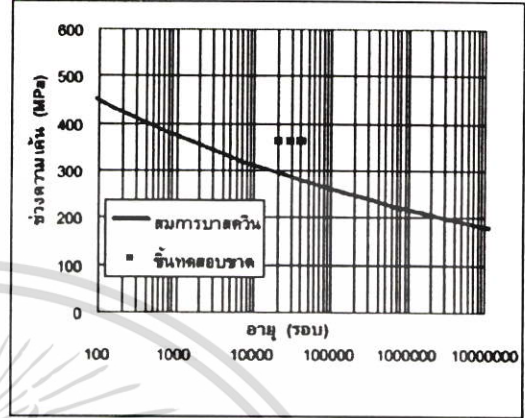


รูปที่ 5 กราฟเปรียบเทียบอายุจากการทดสอบวัสดุ AISI 4140 กับ อายุที่ได้จากการคำนวณ



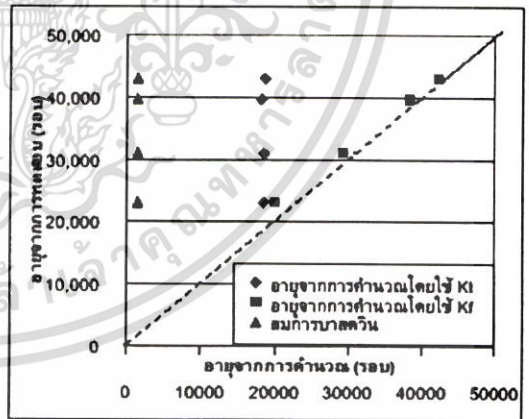
รูปที่ 6 กราฟเปรียบเทียบผลการทดสอบวัสดุอลูมิเนียม 7075 กับ สมการความเครียด

4.3 จากกราฟรูปที่ 6 และ 7 พบว่าการใช้สมการความเครียด ทำนายอายุของชิ้นทดสอบที่ทำจากวัสดุอลูมิเนียม 7075 ได้ค่อนข้างแม่นยำและให้ค่าที่ปลอดภัย(Conservative) ในขณะที่สมการบาสควิน ทำนายอายุที่ปลอดภัยมาก



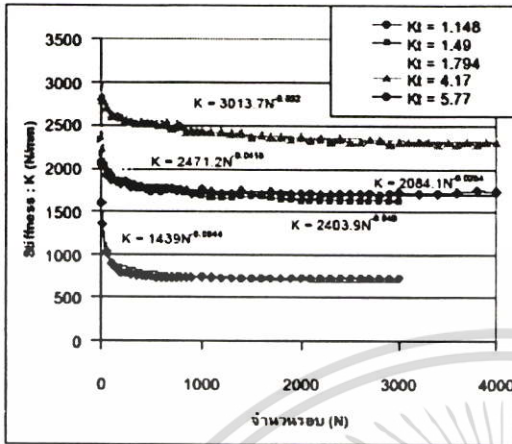
รูปที่ 7 กราฟเปรียบเทียบผลการทดสอบวัสดุอลูมิเนียม 7075 กับ สมการบาสควิน

4.4 จากกราฟรูปที่ 8 พบว่า การใช้ค่า  $K_t$  ในการคำนวณอายุชิ้น ทดสอบที่ทำจากวัสดุอลูมิเนียม 7075 โดยใช้สมการความเครียดจะ ให้ผลที่ใกล้เคียงกับผลการทดสอบมากที่สุด ในขณะที่การใช้ค่า  $K_f$  จะ ให้ผลการคำนวณอายุที่ปลอดภัยมาก เช่นเดียวกับการคำนวณโดยใช้ สมการบาสควิน และที่เฟดเตอร์ความเค้นและสมการการใช้ค่า  $K_t$  หรือ  $K_f$  ในการคำนวณอายุให้ผลที่ไม่แตกต่างกันมากนัก



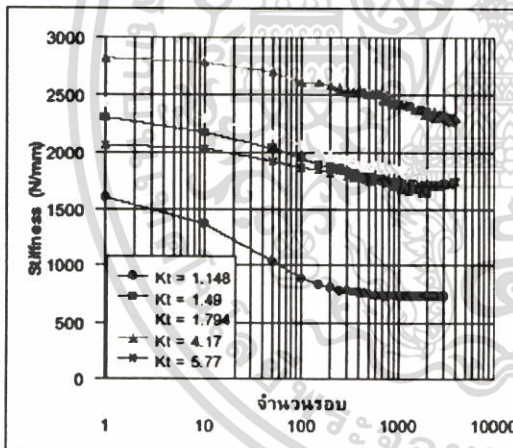
รูปที่ 8 กราฟเปรียบเทียบอายุจากการทดสอบวัสดุอลูมิเนียม 7075 กับอายุที่ได้จากการคำนวณ

4.5 จากกราฟรูปที่ 9 และ 10 พบว่าชิ้นทดสอบที่ทำจากวัสดุโพลีเอไมด์ 6 จะมี Stiffness ลดลงค่อนข้างมากในช่วงแรกๆของการรับแรงแล้วจะลดลงอย่างช้าๆจนเกือบจะคงที่หลังจาก 1000 - 3000 รอบของการรับแรงตามแนวแกนแบบซ้ำๆ โดยมีค่าเฉลี่ยของการลด Stiffness เท่ากับ



รูปที่ 9 กราฟแสดงการสูญเสีย Stiffness กับอายุจากการทดสอบวัสดุโพลีเอไมด์ 6

0.04854 (N/mm) ต่อ รอบ และ ชิ้นทดสอบที่มีค่าเพคเตอร์ความเค้นต่ำจะมีอัตราการลด Stiffness สูงกว่าชิ้นทดสอบที่มีเพคเตอร์ความเค้นต่ำ



รูปที่ 10 กราฟแสดงการลดลงของ Stiffness กับอายุจากการทดสอบวัสดุโพลีเอไมด์ 6

5. บทสรุป

จากการศึกษาทำให้ทราบว่า

1. โดยทั่วไปการคำนวณอายุของชิ้นส่วนที่รับแรงแบบซ้ำๆโดยใช้สมการบาคคินจะให้ค่าอายุที่ปลอดภัยมาก แต่ในกรณีของวัสดุ AISI 4140 ที่ค่าความเค้นต่ำๆ อาจให้ค่าอายุที่ไม่ปลอดภัย

2. การคำนวณอายุโดยใช้สมการอายุความเค้นจะให้ค่าที่ใกล้เคียงกับอายุจริงมากและค่อนข้างปลอดภัย แต่ในกรณีที่มีค่าเพคเตอร์ความเค้นต่ำๆ การคำนวณอายุโดยใช้สมการอายุความเค้นจะให้ผลที่ปลอดภัยมากที่สุด
3. ที่ค่าเพคเตอร์ความเค้นต่ำๆ การใช้ค่า ความเค้นสะสมทางทฤษฎี หรือค่าเพคเตอร์ของความแข็งแรงต่อความล้า จะให้ผลไม่ต่างกันมากนัก
4. ที่ค่าเพคเตอร์ความเค้นต่ำๆ การใช้ค่าเพคเตอร์ของความแข็งแรงต่อความล้า จะให้ผลที่ใกล้เคียงกับอายุจริงมากที่สุด
5. วัสดุโพลีเอไมด์ 6 จะมี Stiffness ลดลงค่อนข้างมากในช่วงแรกๆของการรับแรงแล้วจะเกือบคงที่หลังจาก 1000 - 3000 รอบของการรับแรงตามแนวแกนแบบซ้ำๆ โดยมีค่าเฉลี่ยของการลด Stiffness เท่ากับ 0.04854 (N/mm) ต่อ รอบ และ ชิ้นทดสอบที่มีค่าเพคเตอร์ความเค้นต่ำๆจะมีอัตราการลด Stiffness สูงกว่าชิ้นทดสอบที่มีเพคเตอร์ความเค้นต่ำ

7. กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอขอบคุณศูนย์พัฒนาและวิเคราะห์สมบัติของวัสดุ สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทยที่ให้การสนับสนุนด้านเครื่องมือในการทดสอบความล้าของวัสดุจนสำเร็จลุล่วง

เอกสารอ้างอิง

- [1] J.A. Collins, "Failure of Materials in Mechanical Design", Second edition, John Wiley & Sons, 1993, pp 178.
- [2] วิมล อินทร์แก้ว และ วีรวัช วัชรจิตต์, "คู่มือการเลือกใช้เหล็ก", บริษัท โอเรียนทอล สเปเชียลตีล จำกัด, หน้า 7.
- [3] "Fatigue Design Handbook", Third edition, SAE International, 1997, pp
- [4] J.Edward Shigley and C.R. Mischke, "Mechanical Engineering Design", McGraw-Hill, Fifth edition, 1989, pp 217-218
- [5] R.E. Peterson, "Stress Concentration Factor", John Wiley & Sons, 1974, pp 9 -11.
- [6] K.S. Kim, X.Chen, C.Han and H.W. Lee, "Estimation method for fatigue properties of steel under axial and torsional loading", International Journal of Fatigue, pp. 783-793.

## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล	นายอาณัติ หาทรัพย์
วัน เดือน ปีเกิด	29 ตุลาคม 2516
ที่อยู่	24/219 หมู่บ้านเบ็ญจพุกษ ถ.รังสิต-นครนายก ต.คลองห้า อ.คลองหลวง จ.ปทุมธานี 12120
ประวัติการศึกษา	2539 วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
ความชำนาญเฉพาะด้าน	1) การออกแบบชิ้นส่วนทางกล 2) Experimental stress analysis 2) ทดสอบ วิเคราะห์ความเสียหาย ประเมินอายุชิ้นส่วน วิศวกรรมและชิ้นส่วนโครงสร้าง
ประสบการณ์การทำงาน	
พ.ศ. 2539 – 2540	วิศวกรเครื่องกลบริษัทสยามยูไนเต็ดสตีล (1995) จำกัด
พ.ศ. 2541 – 2543	วิศวกรเครื่องกลบริษัทไทยเคมแมนทีแนนซ์แอนด์เซอร์วิสจำกัด
พ.ศ. 2544 – 2547	นักวิชาการ 5 ศูนย์พัฒนาและวิเคราะห์สมบัติของวัสดุ (ศพว.) สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย (วว.)
พ.ศ. 2548 – ปัจจุบัน	นักวิชาการ 6 ห้องปฏิบัติการพัฒนาคุณสมบัติวัสดุ (หป.พว.) สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย (วว.)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้