

# สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

เครื่องทดสอบการสึกหรอแบบหมุดกดบนจาน

PIN - ON - DISK WEAR TESTER



ปริญญาบัตรนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2549

รฟ.  
21386๓  
2549

เลขหมู่.....

เลขทะเบียน 73169

วัน,เดือน,ปี 10 ก.ค. 2550

b. 11788A58  
i.....

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เครื่องทดสอบการสึกหรอแบบหมุนคดบนจาน  
PIN - ON - DISK WEAR TESTER

โดย

นายประเศศ โสมาลี  
นายกนิชย์ จำไวยักษ์

อาจารย์ที่ปรึกษา  
รศ.ดร.มงคล มงคลวงศ์โรจน์

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาดำเนินการตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต  
ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล  
คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ปีการศึกษา 2549

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
เรื่อง เครื่องทดสอบการสึกหรอแบบหมุดกดบนจาน  
PIN-ON-DISK WEAR TESTER

ผู้จัดทำ

1. นายประเศศ โสมาลี รหัสประจำตัว 47015399
2. นายภินโย จำไวยักษ์ รหัสประจำตัว 47015721



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## เครื่องทดสอบการสึกหรอแบบหมุดกดบนงาน

นายประเศส โสมาลี 47015399

นายภินโย จำไพบรักษ์ 47015721

รศ.ดร.มงคล มงคลวงศ์โรจน์ อาจารย์ที่ปรึกษา

ปีการศึกษา 2549

### บทคัดย่อ

การศึกษาถึงคุณสมบัติของวัสดุทางวิศวกรรมสมัยใหม่กำลังเป็นที่นิยมอย่างสูงและได้พัฒนาอย่างต่อเนื่อง เพื่อให้ได้คุณสมบัติที่ดีที่สุด และเหมาะสมต่อสภาพการใช้งานในสภาวะต่าง ๆ ค่าสัมประสิทธิ์ของความเสียดทาน คลอจนาการสึกหรอ ถือได้ว่าเป็นปัจจัยหลักและเป็นคุณสมบัติพื้นฐานที่สำคัญของการพัฒนา ด้วยเหตุนี้จึงจำเป็นต้องมีการศึกษาถึงความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน การสึกหรอ น้ำหนักที่กดลงบนงาน(0-2) กิโลกรัมและความเร็วรอบทดสอบ (0-300) รอบต่อนาที ภายใต้การทดลองที่สภาวะต่าง ๆ โครงการนี้จึงได้นำเสนอเครื่องทดสอบแบบ Pin - on - Disk ซึ่งเป็นเครื่องทดสอบอีกชนิดหนึ่งที่กำลังได้รับความนิยมอย่างสูงเพื่อใช้ในการทดลองศึกษาถึงความสัมพันธ์ของค่าต่าง ๆ ข้างต้นที่ได้กล่าวมา โดยการจำลองสภาวะการทดสอบต่าง ๆ และหากมีการเปลี่ยนสภาวะการทดสอบก็จะทำให้ความสัมพันธ์บางอย่างเปลี่ยนแปลงไป ผลที่ได้จากการทดลองสามารถนำไปประยุกต์ เพื่อพัฒนาอุปกรณ์ชิ้นส่วนเครื่องจักรกล และเป็นประโยชน์ในการตัดสินใจเลือกใช้วัสดุให้เหมาะสมในงานวิศวกรรมมากที่สุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**Pin – on – Disk Wear Tester**

Mr.Prases Somasee 47015399

Mr.Pinyo Jambiruk 47015721

Assoc.Prof.Dr.Mongkol Mongkolwongrojn Advisor

**Abstract**

The study of wear properties of modern machine parts is very popular and it has developed continuously to get the best quality and reliability. Friction and wear are the most important in design and development of machine at high precision and high operating speed. In this study, the pin on disk wear tester machine is under design and development in order to be able to measure both friction and wear conditions at varying load;0-2 kg and speed;0-300 rpm respectively. The test will be beneficial to the design and development of machine part for selecting the appropriate material for most engineering. In this project, the test specimen is polyethylene, polypropylene. The test was at 1 and 2 kg loads with varying speed to obtain wear characteristics of the polyethylene and polypropylene

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้คงไม่อาจสำเร็จได้ด้วยดีไปได้ หากไม่ได้รับความช่วยเหลือและร่วมมือจากหลาย ๆ ฝ่ายด้วยกัน บุคคลแรกที่ต้องกล่าวถึง เพราะเป็นส่วนสำคัญที่ทำให้วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลงได้ก็คือ รศ.ดร.มงคล มงคลวงศ์โรจน์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ที่ได้ให้ความรู้ ความเอาใจใส่ แนะนำ และช่วยเหลือเสมอมา ซึ่งต้องขอบพระคุณเป็นอย่างมาก

และต้องขอขอบพระคุณบุคคลสำคัญที่สุดที่ทำให้ข้าพเจ้ามีวันนี้ ก็คือ บิดา มารดา อันเป็นที่เคารพรักยิ่ง ซึ่งได้เลี้ยงดูผู้เขียนมาเป็นอย่างดี พร้อมทั้งให้โอกาสในการศึกษาอย่างเต็มที่ และยังให้กำลังใจเอาใจใส่เสมอมา ในทุก ๆ ด้านหาที่เปรียบมิได้ ข้าพเจ้าขอระลึกในพระคุณอันสุดประมาณและขอกราบขอบพระคุณมา ณ ที่นี้

นายประเสศ  
นายภินโย

โสมาลี  
จำเริญ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ

เรื่อง	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญภาพ	V
สารบัญตาราง	VI
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความสำคัญและที่มา	1
1.2 แนวความคิดและแนวคิดในการทำโครงการ	1
1.3 ขอบเขตและแนวทางของการดำเนินงาน	1
บทที่ 2 ทฤษฎี	2
2.1 การสึกหรอ	2
2.1.2 ตัวแปรสำคัญที่มีผลกระทบต่อการสึกหรอ	2
2.2 คุณสมบัติของวัสดุกับพฤติกรรมการสึกหรอ	3
2.3 การสึกหรอของเนื้อโลหะบนเนื้อโลหะ	5
2.4 การสึกหรอจากการขัดถู ( Abrasive wear )	8
2.5 การสึกหรอเนื่องจากความล้า ( Fatigue wear )	9
2.6 การสึกหรอที่มีปฏิกิริยาเคมีเข้ามาเกี่ยวข้อง ( Tribo chemical wear )	10
2.7 ปัจจัยที่มีผลต่อความต้านทานของการสึกหรอ	10
2.8 พฤติกรรมการสึกหรอของพอลิเมอร์	11
2.8.1 การทดสอบการกัดกร่อนจากการแตกของฟองอากาศ ( Cavitation Erosion Test)	12
2.8.2 การทดสอบการสึกกร่อนจากการปะทะของอนุภาคแข็ง ( Particle Erosion Test)	12
2.8.3 การทดสอบการสึกหรอแบบขัดถู ( Abrasion Test )	12
2.8.4 การทดสอบการสึกหรอแบบไถล ( Sliding Wear Test )	12

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

เรื่อง	หน้า
2.9 เครื่องทดสอบมาตรฐาน	18
2.9.1 การสึกหรอแบบขัดถู ( Abrasive )	18
2.9.2 การสึกหรอของโลหะบนโลหะ	19
2.9.3 การทดสอบการสึกหรอแบบอื่นๆ	21
2.10 ปัญหาอื่นๆของการทดสอบการสึกหรอแบบขัดถู	22
2.10.1 การสึกหรอขั้นรุนแรง ( Gouging )	23
2.10.2 การสึกหรอแบบขัดถูที่ค่าความเค้นสูง ( High Stress Abrasion หรือ Grinding Abrasion)	24
2.11 แรงเสียดทาน ( Frictional forces )	28
2.11.1 ความเสียดทานแบบไถล ( Sliding Friction )	29
2.11.2 การเสียดทานแบบกลิ้ง ( Rolling Friction )	31
2.12 การวัดค่าความเสียดทาน	32
2.13 ทฤษฎีคุณสมบัติและการประยุกต์ใช้งานพลาสติก	34
2.13.1 การผลิตพลาสติกในประเทศไทย	34
2.13.2 พอลิโอเลฟินส์ ( Polyolefins )	38
2.13.3 พอลิเอทิลีน ( Polyethylene )	39
2.13.4 พอลิโพรไพลีน ( Polypropylene )	39
2.14 ความสำคัญในการวัดทางกล	40
2.15 วิธีการเบื้องต้นของการวัด	40
2.16 การวิเคราะห์เชิงวิศวกรรม	41
2.17 มอเตอร์กระแสตรง	43
2.17.1 สเต็ปป์มอเตอร์	44
2.17.2 โซลินอยด์ ( Solinoids )	45
บทที่ 3 การออกแบบและการสร้างเครื่องทดสอบ	47
3.1 การคำนวณชิ้นส่วนของเครื่องทดสอบ	47
3.1.1 มอเตอร์	47
3.1.2 เพลาส่งกำลัง	47
3.1.3 คัปปลิ้ง	48
3.1.4 การออกแบบพื้นที่หน้าตัดของหัวกด	48

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

เรื่อง	หน้า
3.1.5 การสร้างเครื่องทดสอบ	49
3.1.6 โครงสร้างอุปกรณ์และชิ้นส่วนต่างๆ	49
<b>บทที่ 4 วิธีการทดลองและผลการทดลอง</b>	<b>57</b>
4.1 คำการสีกหรือที่ได้ทางทฤษฎี	57
4.2 วิธีการทดลองที่ 1	57
4.3 วิธีการทดลองที่ 2	58
4.4 วิธีการทดลองที่ 3	58
4.5 วิธีการทดลองที่ 4	58
4.6 วิธีการทดลองที่ 5	58
4.7 วิธีการทดลองที่ 6	58
<b>บทที่ 5 บทสรุป ข้อเสนอแนะและวิจารณ์ผลการทดลอง</b>	<b>67</b>
5.1 สรุปผลการทดลอง	67
5.2 วิจารณ์ผลการทดลองและวิเคราะห์ปัญหาผลการทดลอง	68
5.3 ปัญหาของมอเตอร์ส่งกำลัง ( คีจี 12 โวลต์ )	68
5.4 ปัญหาของเครื่องมือวัด	68
5.5 ข้อเสนอแนะ	69

## สารบัญภาพ

เรื่อง	หน้า
รูปที่ 2.1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งจุลภาค	4
รูปที่ 2.2 แสดงพื้นผิวของวัสดุ ที่จุดสัมผัส	5
รูปที่ 2.3 แสดงปฏิริยาระหว่างผิวสัมผัส	7
รูปที่ 2.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความสามารถในการต้านทานการสึกหรอ	9
รูปที่ 2.5 ภาพถ่ายระดับจุลภาคแสดงการฝังตัวของอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์	15
รูปที่ 2.6 แสดงการสึกหรอของวัสดุภายหลังจากการทดสอบการสึกหรอ	15
รูปที่ 2.7 การสึกหรอของ PEEK	16
รูปที่ 2.8 การสึกหรอของวัสดุจากการทดสอบการสึกหรอแบบ ไกล	17
รูปที่ 2.9 ภาพถ่ายจุลภาคจากกล้อง SEM	17
รูปที่ 2.10 เครื่องย่อยหินขนาดห้องทดสอบ	22
รูปที่ 2.11 แสดงความสัมพันธ์อัตราส่วนการสึกหรอแบบ Gouging	24
รูปที่ 2.12 ภาคตัดขวางของวัสดุบริเวณรอยต่อเนื้อหลัก	25
รูปที่ 2.13 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งกับความตึงจากผิวด้านนอก	26
รูปที่ 2.14 ความแตกต่างระหว่างอัตราการสึกหรอของวัสดุทดสอบ	27
รูปที่ 2.15 แสดงลักษณะการเคลื่อนที่สัมผัสแบบ ไกลและแบบกลิ้ง	28
รูปที่ 2.16 แสดงการหาค่า สปส.ความเสียดทาน	28
รูปที่ 2.17 แสดงพื้นที่สัมผัสจริงของผิวสัมผัส	30
รูปที่ 2.18 แสดงการวัดค่าความเสียดทานโดยการดึงผ่านรอก	32
รูปที่ 2.19 แดงการวัดค่าความเสียดทานโดยใช้พื้นเอียง	33
รูปที่ 2.20 หลักการทำงานของ Pin-on-Disk	34
รูปที่ 2.21 แผนภูมิการทำงานมอเตอร์	44
รูปที่ 2.22 คุณลักษณะการทำงานของมอเตอร์กระแสตรง	44
รูปที่ 2.23 โครงสร้างสแต็ปปีงมอเตอร์	45
รูปที่ 2.24 โซลินอยด์วาล์ว	46
Part 1	50
Part 2	50
Part 3	51

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญภาพ (ต่อ)

เรื่อง	หน้า
Part 4	51
Part 5	52
Part 6	52
Part 7	53
Part 8	53
รูปที่ 3.1 โครงสร้างทั้งหมด	53
รูปที่ 3.2 ชุดงานและตัวอย่างพลาสติก	54
รูปที่ 3.3 คัปปลิ่งส่งผ่านกำลังและเพลาขับ	54
รูปที่ 3.4 มอเตอร์กระแสตรง	55
รูปที่ 3.5 น้ำหนักที่ทดสอบ	55
กราฟแสดงความสัมพันธ์การสึกหรอทางทฤษฎี	56
กราฟที่ 1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการสึกหรอกับจำนวนรอบ PP กับ PE	59
กราฟที่ 2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการสึกหรอกับจำนวนรอบ PP กับ เหล็ก	60
กราฟที่ 3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการสึกหรอกับความเร็วรอบ PP กับ PE	61
กราฟที่ 4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการสึกหรอกับความเร็วรอบ PP กับ เหล็ก	62
กราฟที่ 5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างรัศมีของกรวด 35,45,55 mm น้ำหนักกด 1,1.5,2 Kg และใช้ความเร็วรอบในการทดสอบ 300 รอบ/นาที	63
กราฟที่ 6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างรัศมีของกรวด 35,45,55 mm น้ำหนักกด 1,1.5,2 Kg และความเร็วรอบในการทดสอบที่ 300 รอบ/ นาที	64
กราฟที่ 7 เปรียบเทียบอัตราการสึกหรอ PP กับ PE	65
กราฟที่ 8 เปรียบเทียบอัตราการสึกหรอ PP กับ เหล็ก	65

## สารบัญตาราง

เรื่อง	หน้า
ตารางที่ 2.1 ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานและอัตราการศึกษา	3
ตารางที่ 2.2 ปริมาณการศึกษาของพลาสติกวิศวกรรม	14
ตารางที่ 2.3 บริษัทผู้ผลิตปิโตรเคมีและเม็ดพลาสติก NPC-I	35
ตารางที่ 2.4 บริษัทผู้ผลิตปิโตรเคมีและเม็ดพลาสติก NPC-II	36
ตารางที่ 2.5 ปริมาณการผลิตเทอร์โมพลาสติกของสหรัฐอเมริกา	38
ตารางที่ 2.6 ปริมาณการผลิตเทอร์โมพลาสติกของไทย	38
ตารางที่ 2.7 เปรียบเทียบคุณสมบัติของพลาสติก	39
ตารางที่ 2.8 การแบ่งกลุ่มพลาสติกตามความหนาแน่น	40
ตารางที่ 2.9 สารละลายและไม่ละลายสำหรับเทอร์โมพลาสติกบางตัว	40
ตารางที่ 2.10 ลักษณะเด่นของวิธีการแก้ปัญหาแต่ละแบบ	43
ตารางผลที่ได้จากการคำนวณทางทฤษฎี	57
ตารางผลการทดลองที่ 1	59
ตารางผลการทดลองที่ 2	60
ตารางผลการทดลองที่ 3	61
ตารางผลการทดลองที่ 4	62
ตารางผลการทดลองที่ 5	63
ตารางผลการทดลองที่ 6	64

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก

เรื่อง	หน้า
รูปที่ 1 เพลามีฟิลเลต	70
(ก) ภายใต้แรงอัด	70
(ข) ภายใต้แรงดึง	70
(ค) ภายใต้แรงบิด	71
ตารางที่ ข.15 คุณสมบัติของพลาสติกบางชนิด	72
ตารางที่ ข.15 (ต่อ)	73
ตารางที่ ข.16 ค่าคงที่ทางกายภาพของวัสดุวิศวกรรมบางชนิด	74
ตารางที่ ข.17 ค่าความแข็งของ Rockwell	75
บรรณานุกรม	



## บทที่ 1

### บทนำ

#### 1.1 ความสำคัญและที่มา

ปัจจุบันวัสดุวิศวกรรมสมัยใหม่ถูกวิจัยและพัฒนา คุณสมบัติให้มีขีดความสามารถสูงในหลายๆ ด้าน เพื่อตอบสนองความต้องการในงานแต่ละด้านของอุตสาหกรรม คุณสมบัติบางประการที่น่าสนใจมากและมีผลต่ออายุการใช้งานของเครื่องจักร คือ การสึกหรอของวัสดุ การศึกษาถึงความสัมพันธ์ของคุณสมบัติ ด้านความเสียดทานของวัสดุ อันเป็นสาเหตุหลักของการสึกหรอ ตลอดจนภาวะที่วัสดุได้รับที่สภาวะต่างๆ โดยมีหัวข้อที่จะศึกษาดังนี้

- 1.อายุการใช้งานของพลาสติก
- 2.การสึกหรอของพลาสติก
- 3.สาเหตุของการสึกหรอ
- 4.คุณสมบัติอื่นๆ

#### 1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ

- 2.1 เพื่อคำนวณออกแบบและสร้างอุปกรณ์เครื่องทดสอบวัสดุชนิดต่างๆ แล้วนำค่าที่ได้ มาวัดผลของการสึกหรอของวัสดุ
- 2.2 เพื่อศึกษาถึงความสำคัญและความเป็นไปได้ของวัสดุ รวมทั้งการนำไปใช้ประโยชน์ต่างๆ
- 2.3 เพื่อเป็นเครื่องทดสอบใช้ในห้องปฏิบัติการ (Lab)
- 2.4 เพื่อศึกษาหน้าสัมผัสผิวที่เกี่ยวกับความเสียดทานและปัจจัยอื่นๆ

#### 1.3 แนวความคิดและแนวคิดในการทำโครงการ

จากสาเหตุดังกล่าวจึงทำให้เกิดแนวความคิดซึ่งเป็นที่มาของโครงการนี้ เพื่อที่จะนำมาใช้เป็นอุปกรณ์การทดลอง ซึ่งสามารถใช้งานได้จริง สามารถที่จะปรับเปลี่ยนการทำงานได้ในหลากหลายลักษณะ อีกทั้งยังมีราคาที่ประหยัด และสามารถให้ผลการทดลองที่แม่นยำ และผลการทดลองที่ได้หาข้อสรุปและข้อแตกต่างของการสึกหรอที่สภาวะต่างๆ กัน

#### 1.4 ขอบเขตและแนวทางของการดำเนินโครงการ

- 1.4.1 ออกแบบเครื่องมือทดสอบ
- 1.4.2 สร้างเครื่องทดสอบการสึกหรอของพลาสติกแบบ Pin-On-Disk
- 1.4.3 สามารถทดสอบการสึกหรอของพลาสติก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 2

### ทฤษฎี

#### 2.1 การสึกหรอ

การสึกหรอของวัสดุโดยส่วนใหญ่เกิดจากการเสียดสีกันของผิวสัมผัสอัตราการสึกหรอจะเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ ตามระยะเวลาของการสัมผัสซึ่งมีตัวประกอบอื่น ๆ ที่ต้องพิจารณาอีกมากมาย เช่น ลักษณะของผิวสัมผัส อุณหภูมิ สปส. ความเสียดทานของวัสดุ ความแข็ง ความเปราะ ฯลฯ

การสึกหรอของวัสดุมีหลายแบบ แต่ละแบบก็มีการศึกษาเจาะลึกในเนื้อหา มีการตีพิมพ์เป็นบทความในหนังสือเยอะมาก ซึ่งให้รายละเอียดของแต่ละแบบอยู่แล้ว โดยในส่วนของเนื้อหาของการสึกหรอ ใครงานนี้มุ่งประเด็นมาที่การศึกษาคุณภาพโดยรวมของการเกิดการสึกหรอ เช่น สูตรที่ใช้ในการคำนวณเรื่องการสึกหรอ ตัวแปรที่สำคัญของการสึกหรอ ตลอดจนผลกระทบจากสาเหตุต่าง ๆ ที่มีผลต่อการสึกหรอ ซึ่งจะได้อธิบายรายละเอียดในหัวข้อต่อไป

##### 2.1.1 สูตรพื้นฐานของการสึกหรอ

###### ARCHARD'S EXPERIMENTAL WEAR LAW

$$V = kND/H$$

เมื่อ  $k$  = ค่าอัตราการสึกหรอ (Wear rate),  $\text{mm}^3/\text{N}\cdot\text{m}$

$N$  = แรงกระทำในแนวตั้งฉาก (Normal load),  $\text{N}$

$D$  = ระยะทางของการเคลื่อนที่ (Distance moved),  $\text{m}$

$H$  = ความแข็ง Hardness Number

$V$  = ปริมาตรของการสึกหรอ (Volume),  $\text{mm}^3$

##### 2.1.2 ตัวแปรสำคัญที่มีผลกระทบต่อการสึกหรอ

1. ภาระที่ใช้ในการทดสอบ
2. ความเร็วในการทดสอบ
3. ความเรียบหรือหยาบของผิวสัมผัส
4. สปส. ความเสียดทานของวัสดุที่นำมาทดสอบ
5. ความแข็งของวัสดุ ความเปราะ ความเหนียว
6. ชนิดของการหล่อลื่น ปริมาณของการหล่อลื่น ความหนาของชั้นฟิล์มน้ำมัน
7. อุณหภูมิของการทดลอง
8. และอื่น ๆ อีกมากมาย

## 2.2 คุณสมบัติของวัสดุกับพฤติกรรมการสึกหรอ

ความเสียหายจากการสึกหรอสามารถเกิดขึ้นได้ทั้งบริเวณผิวหน้าภายนอกและผิวหน้าภายใน ซึ่งมักจะมีสาเหตุจากปฏิกิริยาระหว่างสสาร 2 ตัว ที่สัมผัสกัน กล่าวคือ

- ผิวแข็งเคลื่อนที่บนผิวแข็ง
- อนุภาคแข็งขนาดเล็ก ซึ่งถูกพัดพามาในของเหลวหรือก๊าซ มาปะทะลงบนผิวแข็ง
- การไหลของของเหลวหรือก๊าซบนผิวแข็ง

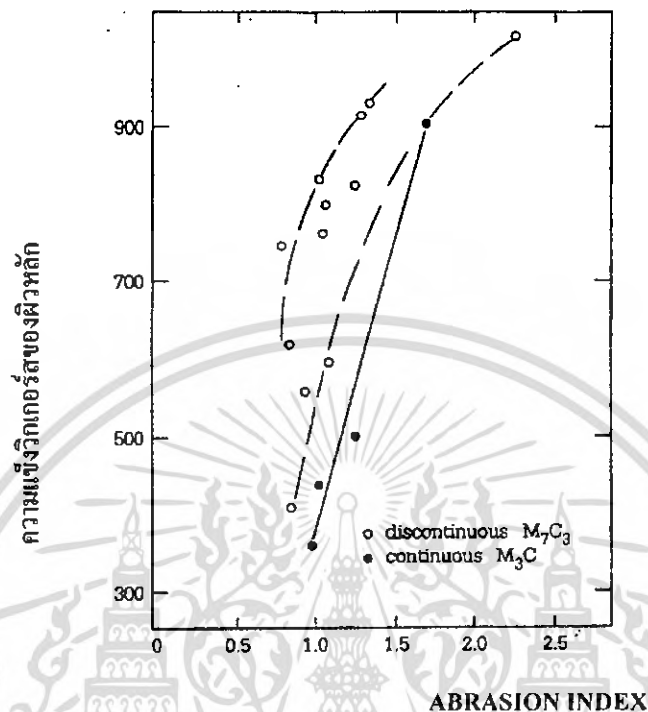
ในแต่ละกรณีข้างต้น ความเสียหายจากการสึกหรอจะเป็นผลมาจากปฏิกิริยาทางกล ทางเคมี และ ทางความร้อน โดยปฏิกิริยาเหล่านี้มักจะเกิดขึ้นพร้อมกัน ดังนั้น ลักษณะและขอบเขตของความเสียหายที่เกิดขึ้นจะขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการ ดังต่อไปนี้

- โครงสร้างจุลภาคของผิวสัมผัสทั้ง 2 หน้า และ โครงสร้างของเนื้อชิ้นงาน
- ประเภทของวัสดุที่มาสัมผัสกัน และ อัตราการหล่อลื่นระหว่างผิว
- การเคลื่อนที่สัมพัทธ์ของผิวหน้า
- แรงกระทำ ณ บริเวณจุดสัมผัส

ปัจจัยเหล่านี้ได้ครอบคลุมถึงคุณสมบัติของวัสดุหลายอย่างด้วยกัน รวมทั้งคุณสมบัติที่สำคัญ 2 ตัว คือ ความเสียดทาน และความแข็ง แต่ความสัมพันธ์ระหว่างความเสียดทานกับการสึกหรอ หรือความแข็งกับการสึกหรอนั้นเป็นกลไกที่ซับซ้อนมาก โดยทั่วไปค่าความเสียดทานที่ต่ำมักจะส่งผลให้อัตราการสึกหรอมีค่าต่ำด้วย

ตารางที่ 2.1 ค่าสัมประสิทธิ์ของความเสียดทานและอัตราการสึกหรอของผู้สัมผัสบางประเภท

คู่ผิวสัมผัส	ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน, $\mu$	อัตราการสึกหรอ ( $\text{cm}^3/\text{cmx}10^{-12}$ )
เหล็กกล้าคาร์บอน 0.2% บนผิวชนิดเดียวกัน	0.62	157,000
Cu -37% Zn -3% Pb อัลลอย บนเหล็กกล้า	0.6	24,000
อัลลอย Stellite บนเหล็กกล้าคาร์บอน	0.6	320
เหล็กกล้าไร้สนิม บนเหล็กกล้าคาร์บอน	0.53	270
ทังสเตนคาร์ไบด์(WC) บนผิวชนิดเดียวกัน	0.35	2
โลหะผิวสะอาดในสุญญากาศ บนผิวชนิดเดียวกัน	1 - 5 หรือสูงกว่า	-
โลหะในบรรยากาศออกซิเจน บนผิวชนิดเดียวกัน	0.4 - 0.1	-
พอลิเมอร์ บนผิวโลหะ	0.1 - 0.3	-
กรณีที่มีสารหล่อลื่นปกคลุมผิววัสดุบางส่วน	0.1	-



รูปที่ 2.1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งระดับจุลภาค (Microhardness) ณ บริเวณผิวสัมผัส กับดัชนีความต้านทานการสึกหรอแบบขัดถู (Abrasion index) ของโลหะผสมที่ร่อนอุทกของ การไบคาร์บอเนตเนื้อ (M<sub>7</sub>C<sub>3</sub>) และแบบไม่ต่อเนื่อง (M<sub>3</sub>C) ผสมอยู่ในโครงสร้าง

ในหลายกรณี การเปลี่ยนแปลงค่าความเสียดทานเพียงเล็กน้อยกลับมีผลให้อัตราการสึกหรอเพิ่มขึ้นได้อย่างมหาศาล ส่วนคุณสมบัติความแข็งที่สูงก็จะทำให้วัสดุมีความสามารถในการต้านทานการสึกหรอที่ดี (ดูรูปที่ 2.1 ประกอบ) แต่ในบางกรณี โครงสร้างที่แข็งกลับสึกไปอย่างรวดเร็วเนื่องมาจากการแตกและหลุดออกของเนื้อที่แข็งแต่เปราะ นอกจากนี้ ประสบการณ์ยังได้สอนเรามากว่าการเปลี่ยนแปลงแรงกระทำ ความเร็วของการเคลื่อนที่ และ/หรือสภาวะแวดล้อมเพียงเล็กน้อยก็สามารถมีผลกระทบต่ออายุแรงต่อกลไกและอัตราการสึกหรอได้

ลักษณะที่คุณสมบัติของวัสดุจะส่งผลกระทบต่อปฏิกิริยาระหว่าง 2 ผิวหน้าขณะที่เกิดการสึกหรอจะต่างกัน ไปแต่ละกรณี ขึ้นอยู่กับเหตุการณ์ที่เกิดขึ้น โดยจะแบ่งออกง่ายๆ ได้เป็น 3 กรณีด้วยกัน ได้แก่

2.2.1 การสึกหรอของเนื้อโลหะบนเนื้อโลหะ (Metal-to-metal wear หรือ Adhesive wear)

2.2.2 การสึกหรอจากการขัดถู (Abrasive wear)

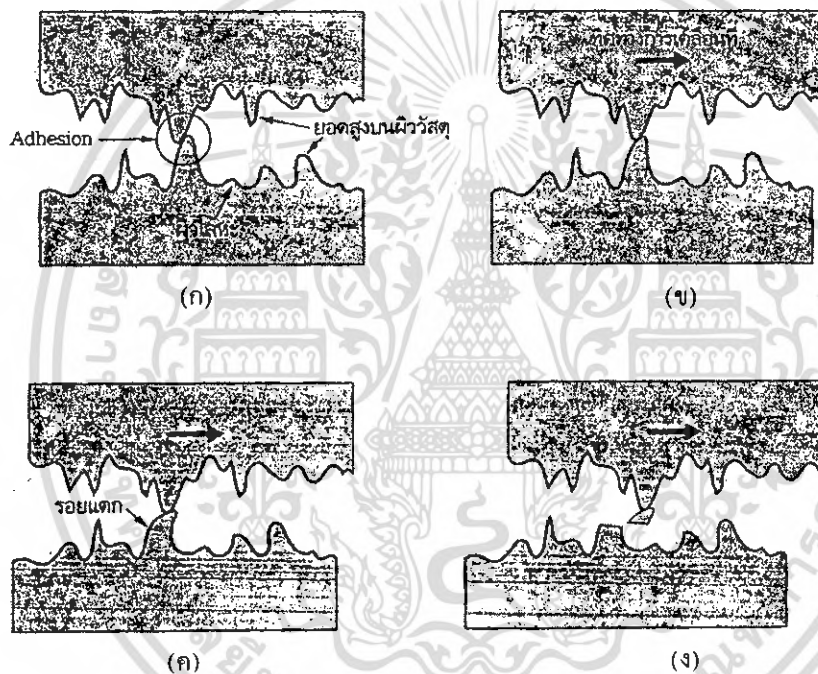
2.2.3 การสึกหรอแบบไถลในสภาวะแห้ง (Dry sliding wear)

ซึ่งรายละเอียดได้นำมาอธิบายไว้ดังต่อไปนี้

## 2.3 การสึกหรอของเนื้อโลหะบนเนื้อโลหะ

### 2.3.1 ลักษณะของคู่ผิวสัมผัส

เมื่อผิวหน้าของโลหะ 2 ผิวหน้าเคลื่อนที่เข้ามาสัมผัสกันภายใต้แรงกด พันธะทางโลหะจะสามารถเกิดขึ้นได้ ณ บริเวณจุดสัมผัส พันธะที่เกิดขึ้นในบริเวณที่ยอดสูง (Asperity) ของวัสดุมาแตะกันนี้เรียกว่าเป็นพันธะแบบแนบติด หรือ "Adhesion" ในขณะที่ผิวหน้า 2 ผิวเคลื่อนที่สัมผัสกัน พันธะแบบแนบติดจะสามารถขยับและหลุดแตกออกจากกันได้ ในขณะที่เดียวกัน ยอดสูงเหล่านี้ก็อาจเกิดการแตกหักออกได้เช่นกันถ้าหากว่าความแข็งแรงของพันธะโลหะนี้มีค่าสูงกว่าความแข็งแรงของยอดสูงของผิวหน้าหนึ่ง ยอดสูงนั้นก็แตกและผิวหน้านั้นจะสูญเสียเนื้อวัสดุไปให้กับคู่ผิวสัมผัส ดังแสดงในรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 แสดงถึงพื้นผิวของวัสดุที่มองเห็นด้วยตาเปล่าว่าเรียบ แต่จะมีความขรุขระในระดับจุลภาคเสมอ เมื่อมาสัมผัสกันจึงเกิดเป็น "จุดสัมผัส" (ในวงกลม) ขึ้น ณ ยอดสูงบนผิวนั้น เมื่อมีพันธะแบบแนบติดเกิดขึ้น การเคลื่อนที่สัมผัสกันระหว่างผิวหน้าจะทำให้เกิดการแตกหักของยอดสูงได้

ในช่วงที่เกิดการสึกหรอ การสร้างพันธะแบบแนบติดและการแตกหักของผิววัสดุตั้งที่กล่าวมาก็จะเกิดขึ้นพร้อมกันอย่างต่อเนื่อง เป็นผลให้เกิดการสูญเสียเนื้อวัสดุจากผิวหนึ่งไปยังอีกผิวหนึ่งตลอดเวลา ซึ่งมักจะเกิดขึ้นทั้ง 2 ทาง โดยเฉพาะอย่างยิ่ง ถ้าวัสดุทั้ง 2 มีโครงสร้างลักษณะคล้ายกัน หรือมีความเข้ากันได้ทางโครงสร้าง (Structural compatibility) ที่ดี เนื่องจากค่าความเสียดทานระหว่างผิววัสดุจะขึ้นอยู่กับความ

เข้ากันได้ นี้ ยกตัวอย่างเช่น โลหะ โครเมียมกับทองแดงมีความเข้ากันได้ทางโครงสร้างต่ำ ดังนั้น ความเสียดทานและการสึกหรอที่เกิดขึ้นระหว่าง 2 ผิวนี้จึงมีค่าที่ต่ำด้วย

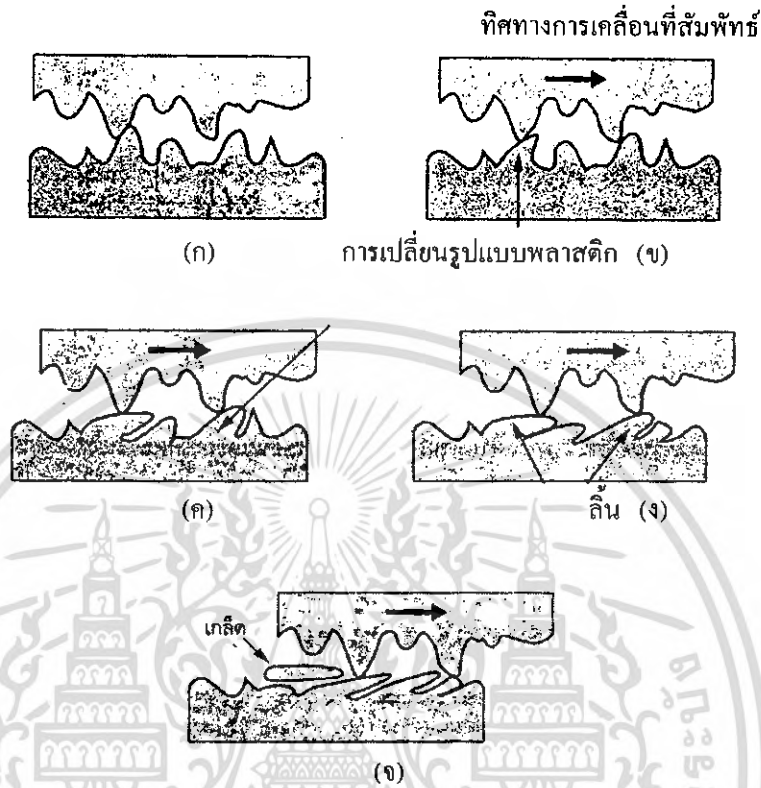
ถ้าหากว่าวัสดุ A มีความแข็งแรงทางกลมากกว่าวัสดุ B โดยรวม วัสดุ B จะสูญเสียเนื้อให้กับวัสดุ A ในขณะที่วัสดุแตกออก ผิวหน้าใหม่ที่เปิดขึ้นบริเวณรอยแตกจะเกิดการออกซิเดชัน ซึ่งปฏิกิริยาจะถูกเร่งโดยความร้อนที่เกิดจากการเสียดสีทำให้เกิดออกไซด์บนผิววัสดุ เมื่อการสึกหรอดำเนินต่อไปและเกิดการแตกหักของยอดสูงอย่างต่อเนื่อง เศษของเนื้อวัสดุที่แตกออกก็จะมาทับถมบนผิวหน้า สร้างเป็นชั้นขึ้นมา ซึ่งชั้นนี้ก็จะมียอดไครด์ของโลหะปนอยู่ด้วย (ออกไซด์ที่ฝังตัวอยู่จะทำให้เนื้อวัสดุบริเวณนั้นแตกง่าย) บางครั้ง ชั้นของเศษทับถมก็จะหลุดล่อนออกมา ทำให้เกิดการสูญเสียเนื้อวัสดุจากทั้ง 2 ผิวสัมผัส

ดังนั้น พฤติกรรมการสึกหรอจึงขึ้นอยู่กับลักษณะของวัสดุทั้ง 2 ที่เข้ามาสัมผัสกัน โดยพันธะแบบแนบติดจะเกิดขึ้นได้ง่ายหากผิวสัมผัสมีความสะอาด ปราศจากออกไซด์บนผิวหน้า (และมีออกไซด์ที่เกิดขึ้นใหม่น้อย) และคู่ผิวสัมผัสมีความคล้ายกันหรือเข้ากันได้ทางเคมีและทางโครงสร้างของวัสดุ

วิธีการป้องกันความเสียหายจากการสึกหรอวิธีหนึ่งที่มีประสิทธิภาพสูงมาก คือ การใช้สารหล่อลื่นของเหลวหรือของแข็งกึ่งของเหลว เช่น น้ำมันหล่อลื่นหรือจารบี โดยให้สารหล่อลื่นนี้กระจายตัวเป็นฟิล์มปกคลุมผิวชิ้นงานเอาไว้ หน้าที่หลักของสารหล่อลื่น เช่น ที่ใช้ในระบบเกียร์หรือลูกปืนแมรี่ต่างๆ คือ เพื่อแยกผิวสัมผัสทั้ง 2 ให้อยู่ห่างออกจากกัน เพื่อจะป้องกันการเกิดพันธะแบบแนบติดและลดการไถครูดจากยอดสูง นอกจากนี้สารหล่อลื่นยังสามารถช่วยการหล่อเย็นของผิววัสดุเพื่อลดอุณหภูมิ ณ จุดสัมผัสได้อีกด้วย

### 2.3.2 ความสามารถในการต้านทานการเปลี่ยนรูปแบบพลาสติก (Plastic Deformation) และการต้านทานความล้า (Fatigue)

ถ้าหากว่าพันธะแบบแนบติดที่กล่าวไว้ข้างต้นไม่ได้เกิดขึ้น วัสดุที่มีความอ่อนนุ่มอาจเกิดการเปลี่ยนรูปแบบพลาสติกในบริเวณยอดสูงที่สัมผัสกับอีกผิวหนึ่งเมื่อโดนแรงกระทำในการเคลื่อนที่สัมพัทธ์ได้ เมื่อถูกดันไปในทิศทางหนึ่ง ยอดสูงเหล่านี้จะถูกบีบให้แบนออกเป็นแผ่นและบิดยาวออกไปในทิศทางนั้น เป็นลักษณะคล้ายลิ่มแรงกระทำซ้ำๆ ในลักษณะนี้จะทำให้ “ลิ่ม” แยกและหลุดออกเป็นเศษเกล็ดเล็กๆ ที่เกิดจากการสึกหรอ (Wear debris) การสึกหรอในลักษณะนี้เรียกว่า “การหลุดล่อน” (Delamination) (ดูรูปที่ 2.3 ประกอบ)



รูปที่ 2.3 แสดงปฏิกิริยาระหว่างผิวสัมผัสเมื่อไม่มีพันธะโลหะแบบแนบติดเกิดขึ้น ผิวที่มีความอ่อนนิ่มของวัสดุมากกว่าจะเปลี่ยนรูปแบบพลาสติก ซึ่งจะนำไปสู่การหลุดล่อนของเศษเกล็ดเล็กๆ ในที่สุด

นอกจากนี้ ความล้าที่เกิดขึ้นจากแรงกดและจากการไถครูดของยอดสูงและอนุภาคแข็งอิสระที่ติดอยู่ระหว่างผิว (เช่น เศษเหล็กจากการสึกหรอและเศษออกไซด์) จะทำให้มีรอยแตกเกิดขึ้นภายในผิววัสดุ ซึ่งจะทำให้เกิดการสึกหรอต่อไป

ดังนั้น ความสามารถในการต้านทานการสึกหรอจึงขึ้นอยู่กับ ความแข็ง ความแข็งแรง ณ จุดคราก (Yield strength) และความสามารถต้านทานการล้า

2.3.3 ความสามารถในการต้านทานการเกิดออกซิเดชันและการกัดกร่อน

ก่อนหน้าที่ผิวของวัสดุจะเข้ามาสัมผัสกันก็มักจะมีชั้นฟิล์มบางๆ ของออกไซด์ปกคลุมผิวอยู่แล้ว ซึ่งฟิล์มออกไซด์ที่อยู่ในลักษณะนี้มักจะทำให้การสึกหรอที่กำลังจะเกิดทวีความรุนแรงมากขึ้น แต่ถ้าหากว่าฟิล์มออกไซด์มีความหนาและมีแรงยึดเกาะสูงพอ จะทำให้พันธะที่เกิดขึ้นบริเวณยอดสูงถูกจำกัด เนื่องจากโลหะกับออกไซด์ซึ่งเป็นเซรามิกมีความเข้ากันได้ทางโครงสร้างต่ำ ดังนั้น อัตราการสึกหรอก็จะลดลงด้วยตามที่กล่าวไว้ในข้างต้นของบทนี้ อย่างไรก็ตาม ถ้าหากว่าฟิล์มออกไซด์นี้เกิดแตกขึ้นมา เช่น ใน

กรณีที่มีแรงกดจากภายนอกเพิ่มสูงขึ้น เนื้อโลหะของยอดสูงที่เปลือยออกก็สามารถมาสัมผัสและเกิดพันธะแบบแนบติดขึ้นได้ นอกจากนี้ความร้อนที่เกิดจากการเสียดสีในกรณีที่เป็นกรณีเสียดสีแบบแห้ง กล่าวคือ ไม่มีการใช้สารหล่อลื่น หรือมีการหล่อลื่นไม่เพียงพอ จะเป็นปัจจัยสำคัญตัวหนึ่งที่จะทำให้เกิดการสร้างฟิล์มออกไซด์บางๆ ขึ้นอีกบนผิว ซึ่งจะแตกออกเมื่อถูกเสียดสี ส่วนหนึ่งของออกไซด์จะไปปะปนอยู่ในชั้นของเศษสึกหรอที่ทับถมกันดังที่กล่าวไปแล้วข้างต้นและอีกส่วนหนึ่งจะหลุดเป็นอิสระออกจากผิว จากพันธะที่เกิดขึ้นประกอบด้วยเศษออกไซด์ที่แตกออกจะทำให้อัตราการสึกหรอที่เกิดเพิ่มสูงขึ้น ความร้อนที่เกิดขึ้นจากการเสียดสียังอาจทำให้เกิดการเปลี่ยนโครงสร้างของวัสดุซึ่งอาจนำไปสู่ปัญหาการสึกหรอที่เพิ่มมากขึ้น และอาจเกิดการบิดเบี้ยวเสีรูปร่างของชิ้นงานนั้นอีกด้วย ส่วนในกรณีที่ผิววัสดุมีการสัมผัสกับสารเคมีหรือมีการใช้สารหล่อลื่น สิ่งเจือปนในน้ำมันหล่อลื่นยังอาจทำให้เกิดการกัดกร่อนบนผิววัสดุอีกด้วย ยกตัวอย่างเช่นในเครื่องยนต์ของรถยนต์ เป็นต้น

ดังนั้น ความสามารถในการต้านทานการสึกหรอโดยรวมของวัสดุหนึ่งๆ จึงขึ้นอยู่กับโครงสร้างทางเคมีของผิวหน้าของวัสดุนั้น ที่จะสามารถต้านทานการเกิดออกซิเดชันและการกัดกร่อนได้

#### 2.4 การสึกหรอจากการขัดถู(Abrasive Wear)

วัสดุที่สามารถต้านทานการสึกหรอจากการขัดถูได้ดีมักจะมี โครงสร้างจุลภาคแบบแบ่งเป็นเฟส ซึ่งประกอบด้วย (1) เนื้อหลักหรือ matrix (เฟสที่มีความต่อเนื่อง เป็นตัวกลาง/ตัวประสานในวัสดุ) ที่มีความเหนียว(Toughness) และ (2) อนุภาคแข็งขนาดเล็ก เช่น สารประกอบคาร์ไบด์ หรือยูเรทติกคาร์ไบด์ กระจายอยู่ทั่วไปในเนื้อหลัก ขณะที่เกิดการขัดถูวัสดุนี้ก็จะสึกหรอออกไปด้วยสาเหตุต่างๆ เหล่านี้ ได้แก่

2.4.1 การสึกหรอ และ/หรือ การกัดกร่อนเฉพาะที่บริเวณเนื้อหลักเท่านั้น (Selective removal)

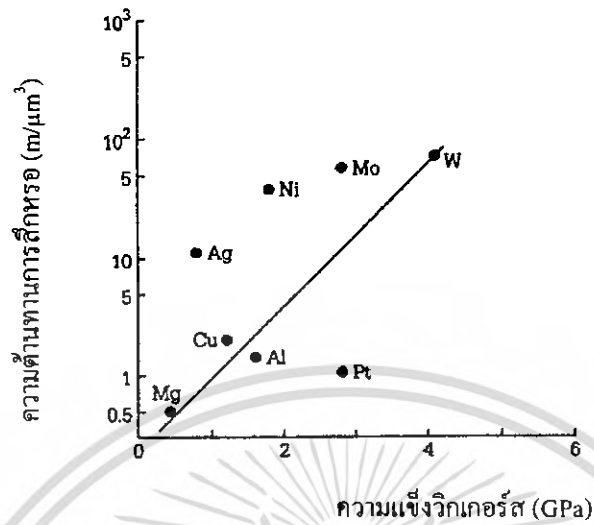
2.4.2 การสึกหรอโดยการเปลี่ยนรูปของเนื้อหลัก

2.4.3 การแตกและหลุดของอนุภาคแข็งภายในเนื้อหลักเนื่องจาก

- แรงกระทำภายนอก (เช่น แรงกดแบบ Indentation)
- การเปลี่ยนรูปแบบพลาสติก หรือการสึกหรอของเนื้อหลักรอบๆ อนุภาคนั้น
- การแตกของรอยต่อระหว่างอนุภาคแข็งและเนื้อหลัก

2.4.4 การแตกจากความล้าเนื่องมาจากการกระทำซ้ำๆของแรงกดและการโก่งคูด

ในสภาวะการใช้งานส่วนมากการสึกหรอแบบขัดถูมักจะมีกรณีที่มีแรงกระทำเฉพาะที่ที่ชิ้นงานอยู่ด้วยในการเลือกใช้วัสดุสำหรับผลิตชิ้นงานต่างๆ จึงต้องพิจารณาถึงคุณสมบัติหลายประการ รวมถึงความแข็งเพื่อป้องกันการสึกหรอ การขูดข่วน และความเหนียวเพื่อป้องกันการแตกหักของชิ้นงาน



รูปที่ 2.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความสามารถในการต้านทานการลึกรของโลหะบริสุทธิ์ที่เสียดสีบนโลหะชนิดเดียวกันภายใต้สภาวะที่ปราศจากสารหล่อลื่น กับความแข็งวิกเกอร์ส

คุณสมบัติด้านความแข็งมักจะถูกนำมาเป็นแนวทางในการเปรียบเทียบความสามารถในการต้านทานการลึกรของวัสดุ ดังแสดงในรูปที่ 2.4 แต่ค่าความแข็งรวมของเนื้อวัสดุเพียงอย่างเดียวไม่สามารถอธิบายถึงความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งกับความต้านทานการลึกรได้ดีเท่าไรนัก สังเกตได้จากการกระจายตัวของข้อมูลในกราฟ ดังนั้น เพื่อให้ความสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัติ 2 ตัวนี้มีความหมายมากที่สุด เราควรพิจารณาตั้งแต่ ค่าความแข็งเริ่มแรกของวัสดุ ค่าความแข็งผิวที่เพิ่มขึ้นจากความเครียดเมื่อผ่านการใช้งาน (Work hardening) และความลึกของความแข็งดังกล่าว ความแข็งของเฟสต่างๆ ในเนื้อวัสดุ การกระจายตัวของเฟสนั้นๆ และผลกระทบของอุณหภูมิขณะใช้งานที่มีต่อความแข็ง

ดังนั้น สำหรับการลึกรแบบขั้วคู่ เราจะต้องคำนึงถึงโครงสร้างจุลภาคของวัสดุซึ่งเป็นสิ่งที่ควบคุมความแข็ง รวมถึงความแข็งที่เพิ่มขึ้นโดยความเครียด ความเหนียว และที่สำคัญพฤติกรรมการกัดกร่อน เนื่องจากในการนำชิ้นส่วน ไปใช้งานมักจะต้องมีของเหลวหรือก๊าซที่มีฤทธิ์กัดกร่อนเข้ามาเกี่ยวข้อง

## 2.5 การลึกรเนื่องจากความล้า (Fatigue Wear)

การลึกรที่เกิดจากการล้านี้ ปัจจัยที่สำคัญที่สุดก็คือ พลังงานในการแตกหัก ดังนั้น สมบัติที่สำคัญที่เป็นตัวบ่งชี้การลึกรประเภทนี้ก็คือ ความเหนียว การลึกรที่เกิดขึ้นนี้เกิดจากการ สะสมของการเสียหายที่เห็นไม่เด่นชัดนักจากการให้แรงซ้ำไปซ้ำมา หรือการให้แรงกระทำแบบวงรอบ (Cyclic load) เป็นจำนวนมากรอบจนในที่สุดการเสียหายก็เกิดขึ้นอย่างเห็นได้ชัด นั่นคือ เกิดการหลุดออกของอนุภาคจากพื้นผิวของวัสดุที่อ่อนนุ่มกว่า การลึกรแบบนี้มักไม่รุนแรงและจะเกิดเมื่อมีการหมุนหรือการไถล

ของวัสดุ การสึกหรอแบบนี้มักจะพบควบคู่ไปกับการเกิดการสึกหรอแบบขจัดและ การสึกหรอแบบแนบติด ถึงแม้ว่าการสึกหรอประเภทนี้จะเกิดขึ้นที่ผิวหน้าของวัสดุเช่นเดียวกัน แต่อาจมีผลมาจากการล้าของตัวเนื้อวัสดุทั้งหมด ซึ่งเกี่ยวข้องกับการเกิดรอยแตกและการเติบโตของรอยแตกนั้นๆ ดังนั้น พอลิเมอร์ที่มีความเหนียวสูงจะมีความสามารถในการต้านทานการสึกหรอและการฉีกขาดได้เป็นอย่างดี

## 2.6 การสึกหรอที่มีปฏิกิริยาเคมีเข้ามาเกี่ยวข้อง ( Tribo-Chemical Wear )

นอกจากกลไกการสึกหรอทั้ง 3 ประเภทที่กล่าวมาแล้วนั้น ยังมีการสึกหรออีกประเภทหนึ่งซึ่งเกิดจากการที่พอลิเมอร์มีปฏิกิริยากับสิ่งแวดล้อม เช่น ออกซิเจน โอโซน ความร้อนที่เกิดจากแรงเสียดทาน การปนเปื้อนของพื้นผิว (Surface contamination) ฯลฯ ในการเกิดปฏิกิริยาเหล่านี้มักจะมียอนอนุภาคหรือไอออนที่มีพลังงานเข้ามาเกี่ยวข้อง เช่น ฟรีเรดิคัล (Free radical) อิเล็กตรอน และ ไอออนประจุบวก เป็นต้น การสึกหรอลักษณะนี้อาจกลายเป็นการสึกหรอเนื่องจากความล้าได้ในที่สุด

ยิ่งกว่านั้นจากการศึกษาพบว่า นอกจากการสึกหรอแบบที่มีปฏิกิริยาทางเคมีเข้ามาเกี่ยวข้องนี้แล้ว กลไกการสึกหรออื่นๆ ก็จะไปสู่การเกิดการสึกหรอเนื่องจากความล้าได้ในที่สุดเช่นกัน โดยเฉพาะอย่างยิ่งภายใต้ความเค้นวงรอบหรือความเค้นที่กลับไปกลับมา (Cyclic stress) นอกจากนี้ยังสามารถกล่าวได้ว่าโดยทั่วไปแล้วนั้นวัสดุที่มีความสามารถในการต้านทานการสึกหรอได้หลายกลไกนั้นหาได้ยาก และถ้ามีวัสดุนั้นควรจะมีพลังงานพื้นผิวที่ต่ำ มีความเหนียว และความแข็งสูง ยกตัวอย่างเช่น พอลิเมอร์ที่แข็งและเหนียวจะมีความสามารถในการต้านทานการสึกหรอแบบขจัดและแบบที่เกิดจากความล้าได้ดี แต่อาจจะไม่ทนต่อการสึกหรอแบบแนบติด ดังนั้น พอลิเมอร์แบบนี้สามารถนำมาปรับปรุงพื้นผิว (Surface modification) ด้วยพอลิเมอร์ที่มีพลังงานพื้นผิวต่ำ เช่น PTFE หรือ Teflon ซึ่งจะทำให้ได้วัสดุพอลิเมอร์ที่มีความสามารถในการต้านทานการสึกหรอได้ครบทั้ง 3 รูปแบบ คือ การสึกหรอแบบแนบติด แบบขจัด และแบบที่เกิดจากความล้า

## 2.7 ปัจจัยที่มีผลต่อความต้านทานของการสึกหรอ

นอกจากการควบคุมการสึกหรอโดยวิธีการต่างๆ ที่กล่าวมาแล้วนั้น ปัจจัยภายนอกบางประการ เช่น อุณหภูมิหรือความชื้น ก็ส่งผลกระทบต่อความสามารถในการต้านทานการสึกหรอของพอลิเมอร์ได้เช่นกัน Tanaka และ Yamada ได้แสดงให้เห็นถึงผลกระทบของอุณหภูมิที่มีต่อแรงเสียดทานและการสึกหรอของพอลิเมอร์ทนความร้อนบางชนิด คือ พอลิอิมิด (Polyimide : PI), พอลิเอมิด-อิมิด (Polyamide-imide : PAI), พอลิอีเทอร์อีเทอร์ คีโตน (Polyether ether ketone : PEEK), พอลิฟีนิลีนซัลไฟด์ (Polyphenylene sulfide : PPS) ชนิดที่มีการเสริมแรงด้วยใยแก้ว และ พอลิอีเทอร์ซัลโฟน (Polyether sulfone : PES) จากการศึกษพบว่าแรงเสียดทานของพอลิเมอร์แต่ละชนิดจะแตกต่างกันไป กล่าวคือ PI, PAI และ PEEK แสดงค่าแรงเสียดทานที่ต่ำ ในขณะที่ PES มีแรงเสียดทานที่สูง ณ อุณหภูมิสูงกว่า 200°C สำหรับอัตราการสึกหรอพบว่า PI จะมีอัตราการสึกหรอที่ต่ำกว่าพอลิเมอร์ชนิดอื่นในช่วงอุณหภูมิที่ทำการทดสอบถึง 300°C ในขณะที่ PAI มีอัตราการสึกหรอสูงกว่า PI ถึง 10 เท่า ส่วน PEEK, PPS และ PES จะมีอัตราการสึกหรอต่างกัน ไปขึ้นอยู่กับอุณหภูมิที่ทำการทดสอบและมีอัตราการสึกหรอเพิ่มขึ้นเมื่อ

อุณหภูมิที่ทำการทดสอบเพิ่มขึ้น ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิหลอมเหลวและอุณหภูมิกลาสทรานสิชัน ( $T_g$ ) ของพอลิเมอร์แต่ละชนิดอีกด้วย

Dowson และคณะ ได้ศึกษาถึงอิทธิพลของรายละเอียดลักษณะของพื้นผิวคู่สัมผัส (Counterflectopography) ที่มีต่ออัตราการสึกหรอของพอลิเอทิลีนชนิดมวลโมเลกุลสูงพิเศษ (Ultra high molecularweight polyethylene : UHMWPE) ภายใต้สภาวะแห้งในบรรยากาศปกติ และในสภาวะเปียก โดยใช้น้ำกลั่นคู่สัมผัสที่นำมาศึกษา คือ เหล็กกล้าไร้สนิม จากการศึกษาพบว่าภายใต้สภาวะแห้งอิทธิพลของลักษณะของพื้นผิวคู่สัมผัสซึ่งก็คือ เหล็กกล้าไร้สนิมที่มีต่อการสึกหรอจะค่อนข้างน้อย และในสภาวะเปียก คือ มีน้ำอัตราการสึกหรอของพอลิเมอร์จะลดลงเมื่อความหยาบของผิวหน้าคู่สัมผัสลดลง ซึ่งโดยทั่วไปแล้วอัตราการสึกหรอของวัสดุที่อ่อนกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับคู่สัมผัสที่มีความแข็งจะลดลงเมื่อมีการปรับปรุงคุณภาพของผิวหน้าคู่สัมผัสให้ดีขึ้น กล่าวคือ มีความหยาบลดลงนั่นเอง

## 2.8 พฤติกรรมการสึกหรอของพอลิเมอร์

วัสดุพอลิเมอร์ที่ได้รับความสนใจในการศึกษาถึงพฤติกรรมหรือกลไกการสึกหรอ โดยส่วนใหญ่ มักจะเป็นพลาสติกวิศวกรรมหรือพอลิเมอร์เชิงประกอบ ตัวอย่างที่รู้จักกันดี ได้แก่ พอลิอิมีด (PI), โพลีเตตระฟลูออโรเอทิลีน (Polytetrafluoroethylene : PTFE), พอลิเอทิลีนชนิดมวลโมเลกุลสูงพิเศษ (UHMWPE), พอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต (Polyethylene terephthalate : PET) ตลอดจน พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (HDPE) เป็นต้น

พอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต หรือ PET จัดเป็นพลาสติกที่มีการใช้งานกันอย่างกว้างขวางและแพร่หลายมากที่สุดชนิดหนึ่ง เป็นที่รู้กันดีว่า PET มีคุณสมบัติที่ค่อนข้างแปลก คือ ปริมาณความเป็นผลึก (Crystallinity) จะแปรเปลี่ยนไปตามอุณหภูมิที่วัสดุได้รับ ซึ่งโครงสร้างทางสัณฐานวิทยาและโครงสร้างของโมเลกุลนี้ล้วนแต่มีบทบาทที่สำคัญต่อพฤติกรรมการสึกหรอทั้งสิ้น นั่นคือ ปริมาณความเป็นผลึกเป็นปัจจัยทางโครงสร้างของพอลิเมอร์โครงสร้างกึ่งผลึก (Semicrystalline polymer) ที่มีความสำคัญต่อการสึกหรอไม่เพียงแต่กับ PET เท่านั้นมีงานวิจัยมากมายที่ทำการศึกษาถึงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความเป็นผลึกและการสึกหรอของพอลิเมอร์ เช่น PTFE จะมีปริมาณการสึกหรอลดลงเมื่อความเป็นผลึกสูงขึ้น ในขณะที่พอลิคลอโรโพรไพลีน PCTFE [Poly (chlorotrifluoroethylene) : PCTFE] ที่มีปริมาณความเป็นผลึก 65% จะมีการสึกหรอมากกว่า PCTFE ที่มีปริมาณความเป็นผลึก 45% จากความแตกต่างดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าปริมาณความเป็นผลึกมีผลต่อการสึกหรอค่อนข้างซับซ้อน สำหรับ PET เองนั้น จากงานศึกษาวิจัยที่ผ่านมาพบว่าโครงสร้างของ PET ที่ปริมาณความเป็นผลึกต่างกันจะมีโครงสร้างทางสัณฐานวิทยาต่างกัน นั่นคือ ที่ปริมาณความเป็นผลึก 8% PET จะมีโครงสร้างแบบอสัณฐาน และเมื่อความเป็นผลึกสูงขึ้นเป็น 39% และ 55% PET จะมีโครงสร้างแบบสเฟียรูไลต์ (Spherulite) และเมื่อปริมาณความเป็นผลึกสูงถึง 75% พบว่า PET จะมีโครงสร้างแบบเส้นใย ซึ่งโครงสร้างเหล่านี้ล้วนแต่มีผลต่อการสึกหรอต่างกัน ไป จากผลการศึกษาพบว่าแรงเสียดทานขึ้นกับปริมาณความเป็นผลึกเล็กน้อยในขณะที่อัตราการสึกหรอเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณความเป็นผลึกเพิ่มขึ้น (คล้ายกับ PCTFE ) โดยเฉพาะจะเห็น

ได้ชัดเจนที่ปริมาณความเป็นผลึกมากกว่า 40 % โดยที่กลไกการสึกหรอจะแตกต่างกัน นั่นคือ ที่ปริมาณความเป็นผลึกต่ำ (ประมาณ 8 % ) การสึกหรอจะเกิดเนื่องจากการถ่ายเทเนื้อ PET ไปที่คู่สัมผัส ในขณะที่ปริมาณความเป็นผลึกสูงการสึกหรอจะเกิดเนื่องจากการล้าในระหว่างการเลื่อนไถลไปมาระหว่าง PET กับคู่สัมผัสโลหะความแตกต่างของกลไกการสึกหรอนี้เกิดเนื่องจากความแตกต่างของสัณฐานวิทยานั้นเอง

เพื่อให้เข้าใจถึงความสามารถในการต้านทานการสึกหรอของพอลิเมอร์แต่ละชนิดว่ามีความแตกต่างกันไปขึ้นกับภาวะและวิธีการทดสอบ ตารางที่ 2.2 ได้สรุปค่าการสึกหรอของพอลิเมอร์ที่ทำการทดสอบ 4 วิธี ซึ่งจำลองมาจากโอกาสในการใช้งานพลาสติกในทางวิศวกรรม ดังต่อไปนี้

#### 2.8.1 การทดสอบการสึกกร่อนจากการแตกของฟองอากาศ (Cavitation Erosion Test)

โดยวัดปริมาตรที่สูญเสียไปต่อพื้นที่ 1 ตารางเซนติเมตร ภายหลังจากการทดสอบ 5 ชั่วโมง โดยการทดลองในน้ำกลั่นและวางเครื่องเจาะด้วยคลื่นอัลตราโซนิค (Ultrasonic drill) ให้ห่างจากพื้นผิวซึ่งทดสอบพอลิเมอร์เป็นระยะทาง 0.35 มิลลิเมตร ซึ่งความถี่ที่สูงนี้ก่อให้เกิดการหลุดออกไปของพื้นผิวทดสอบ การทดสอบโดยวิธีนี้เป็นการจำลองภาวะการใช้งานของท่อใบพัดหรือวาล์วที่ใช้งานในเหมืองภายใต้ระบบไฮดรอลิก

#### 2.8.2 การทดสอบการสึกกร่อนจากการปะทะของอนุภาคแข็ง (Particle Erosion Test)

โดยการวัดปริมาตรที่สูญเสียไปต่อพื้นที่ 1 ตารางเซนติเมตร ภายหลังจากการยิงอนุภาคของซิลิคอนคาร์ไบด์ (SiC) จำนวน 50 กรัม ที่อัตราการไหล 0.123 กรัม/วินาที เข้าไปยังท่ออากาศความเร็ว 60 เมตร/วินาที ตรงไปยังชั้นทดสอบพอลิเมอร์ที่มีขนาด 14X14 ตารางมิลลิเมตร และเอียงเป็นมุม 45° การทดลองนี้เป็นการจำลองภาวะการใช้งานเมื่ออนุภาคของวัสดุขุดถูกระทบขึ้นส่วนของเครื่องจักรด้วยความเร็วสูง เช่น พัดลม บีม โดยมีตัวกลางในการลำเลียง คือ ก๊าซ หรือของเหลว

#### 2.8.3 การทดสอบการสึกหรอแบบขัดถู (Abrasion Test)

โดยการวัดปริมาตรหรือน้ำหนักที่สูญเสียไปต่อพื้นที่ 1 ตารางเซนติเมตร เมื่อใช้ระยะทางในการทดสอบ 3.66 เมตร โดยทำการขัดสีชั้นทดสอบพอลิเมอร์ตัวอย่างยาว 30 มิลลิเมตร พื้นที่หน้าตัด 10 X 10 ตารางมิลลิเมตร ด้วยตัวขัดที่ทำจากอะลูมินา (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) ซึ่งแทรกอยู่ตรงกลางชั้นทดสอบและให้แรงกระทำ 1 กิโลกรัม เคลื่อนที่ด้วยความเร็ว 0.26 เมตร/วินาที

#### 2.8.4 การทดสอบการสึกหรอแบบไถล (Sliding Wear Test)

โดยการวัดปริมาตรที่สูญเสียต่อระยะทางในการทดสอบ 1 เมตร ด้วยแรงกระทำ 1 นิวตัน ซึ่งเป็นค่าที่แสดงถึงอัตราการสึกหรอของพอลิเมอร์ที่ภาวะคงที่ โดยชั้นทดสอบพอลิเมอร์ขนาด 10 X 10 ตารางมิลลิเมตร มีลักษณะเป็นรูปแท่ง วางตั้งฉากกับแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมด้วยแรงดัน 10 MPa โดยที่ความเร็วในการทดสอบคือ 0.25 เมตร/วินาที ทำการทดสอบในน้ำกลั่น ซึ่งเป็นการทดสอบสำหรับพอลิเมอร์ที่ใช้ในงานประเภทซีลและรองลิ้นในอุปกรณ์ไฮดรอลิกของเครื่องจักรต่างๆ ซึ่งต้องใช้งานที่ความดันและความเร็วสูง

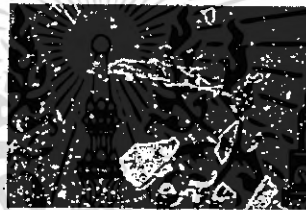
จากตารางที่ 2.2 จะเห็นว่าการเกิดการสึกหรอโดยการทดสอบการสึกกร่อนจากการแตกของ ฟองอากาศนั้นสามารถแบ่งพอลิเมอร์ออกเป็นกลุ่ม ๆ ตามปริมาตรหรือน้ำหนักที่สูญเสียไปจากการ ทดสอบ วัสดุที่มีสมรรถภาพดี คือ พอลิเอทิลีน พอลิเอทิลีน ไนลอนผสมสารหล่อลื่นของแข็ง และ พอลิอะซิเตต (Polyacetal) บางชนิด ซึ่งมีค่าการสึกหรอน้อยกว่า 1 ลูกบาศก์มิลลิเมตร/ตารางเซนติเมตร โดยเฉพาะอย่างยิ่งพอลิเอทิลีน 6.6 จะมีคุณสมบัติเด่นมาก แต่อย่างไรก็ตามพบว่า อัตราการสึกหรอจะ เพิ่มขึ้นอย่างมากเมื่อเวลาผ่านไป 7 ชั่วโมง และที่ 20 ชั่วโมง มีปริมาตรการสูญเสียสะสมถึง 3.60 ลูกบาศก์มิลลิเมตร/ตารางเซนติเมตร เมื่อเทียบกับพอลิเอทิลีนชนิดมวลโมเลกุลสูงพิเศษ (UHMWPE) ซึ่งมีค่าเพียง 1 ลูกบาศก์มิลลิเมตร/ตารางเซนติเมตร สำหรับพอลิยูรีเทน (Polyurethane) จะเป็นพอลิเมอร์ที่เกิดความเสียหายอย่างรุนแรงมากที่สุด จากภาพถ่ายในระดับจุลภาคของพอลิเมอร์ที่เกิดการสึกหรอแสดงให้เห็นถึงกลไกการสึกหรอที่มีทั้งแบบเหนียว (Fully ductile) และแบบเปราะ (Fully brittle) โดยพอลิเมอร์ที่มีความอ่อนนุ่ม เช่น พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (HDPE) หรือไนลอนผสมสารหล่อลื่นของแข็งจะมีกลไกการเสียหายแบบเหนียว ในขณะที่พอลิเมอร์ที่แข็งเปราะ เช่น PET พอลิคาร์บอเนตและ พอลิซัลโฟน จะมีกลไกการเสียหายแบบเปราะ และพอลิเมอร์บางชนิด เช่น พอลิอะซิเตตและพอลิอะซิเตตผสม จะมีกลไกอยู่ระหว่างแบบเหนียวและแบบเปราะ ดังนั้น จากตารางจะสรุปได้ว่าพอลิเอทิลีนและพอลิเอทิลีนจะมีความต้านทานการสึกกร่อนเนื่องจากการแตกของฟองอากาศที่ดีที่สุด

ตารางที่ 2.2 ปริมาณการสึกหรอของพลาสติกวิศวกรรมที่ทำการทดสอบโดยวิธีการต่างๆ

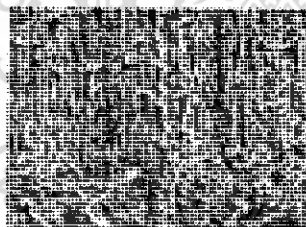
Polymer	Trade name	ปริมาณการสึกหรอในการทดสอบแบบ			
		Particle (mm <sup>3</sup> cm <sup>-2</sup> ) (5x50g)	Cavitation (mm <sup>3</sup> cm <sup>-2</sup> ) (5h)	Abrasion (mm <sup>3</sup> cm <sup>-2</sup> ) (3.66m)	Sliding wear (mm <sup>3</sup> N <sup>-1</sup> m <sup>-1</sup> )
Polyurethane A	Vulkanol	6.35	-	-	-
Polyurethane B	Polecat 880	0.30	-	4.59	-
Polyurethane C	Polecat 885	1.60	-	9.02	-
DS UHMWPE	DS-Solidur	12.70	0.53	6.80	7.06x10 <sup>-9</sup>
UHMWPE	Solidur10/100	13.60	0.85	7.35	5.10x10 <sup>-7</sup>
HDPE	Solidur80/100	11.75	1.06	6.73	-
Polyacetal+PE	PAS-LX	37.79	0.24	14.44	4.89x10 <sup>-6</sup>
Polyacetal Copolymer	Hostaform	38.50	0.64	14.33	1.17x10 <sup>-5</sup>
Polyacetal					
Polyacetal+PE+GF	Deldrin500	40.54	2.79	14.81	1.18x10 <sup>-5</sup>
Polyacetal+GF	PAS-LGX	37.45	3.01	14.78	-
Polyamide 6,6+PE	PAS-LG	50.13	3.14	14.48	-
Poly(amide-imide)	PAS-80X	32.15	0.09	7.48	7.88x10 <sup>-6</sup>
Polypropylene	Torlon4301	52.05	10.07	17.73	-
Polysulfone	PAS-PP	17.72	11.20	9.14	-
PET	PAS-SUL	18.60	21.53	12.48	-
Polycarbonate	Ertalyte	31.50	35.57	8.10	-
Polyvinylidene fluoride	Kynar	14.25	Melted	12.10	-
Nylon-MoS <sub>2</sub>					-
Polyester+MoS <sub>2</sub>	NylatronGSM	15.14	0.25	5.87	
Polyetheretherketone	Vesconite	30.58	29.13	13.45	1.77x10 <sup>-5</sup>
PEEK+30%C+filler		16.77	2.36	7.86	5.91x10 <sup>-6</sup>
		28.36	14.15	13.74	1.24x10 <sup>-4</sup>
					1.75x10 <sup>-6</sup>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

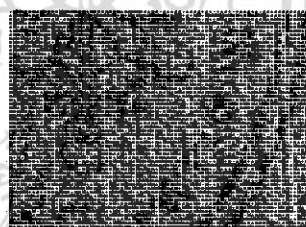
สำหรับการสึกหรอจากการทดสอบโดยวิธีที่ 2 คือ การสึกกร่อนจากการปะทะของอนุภาคแข็ง พบว่าพอลิเอทิลีนจะมีความต้านทานการสึกหรอสูงสุด ในขณะที่พอลิอะซิโตนจะมีค่าต่ำสุด สำหรับพอลิยูรีเทนนั้นพบว่า อนุภาคของซิลิกอนคาร์ไบด์จากการทดสอบจะเข้าไปฝังตัวอยู่บนผิวหน้าของพอลิยูรีเทน ดังแสดงในรูปที่ 2.5 ดังนั้น จึงทำให้พอลิยูรีเทนมีคุณสมบัติด้านการต้านทานการสึกหรอที่ดีขึ้น ดังจะเห็นได้จากค่าปริมาณการสึกหรอที่แสดงในตารางที่ 2.2 โดยปกติค่าการสึกหรอที่วัดจากการยิงด้วยอนุภาคแข็ง นี้จะมีความสัมพันธ์กับความแข็งและความสามารถในการยืดดึง (Elongation) ของพอลิเมอร์ กล่าวคือ พอลิเมอร์จะสามารถต้านทานการสึกหรอได้มากขึ้นเมื่อความแข็งลดลงและพอลิเมอร์นั้นสามารถยืดตัวออกได้มาก ซึ่งแนวโน้มนี้สะท้อนให้เห็นถึงความสำคัญของคุณสมบัติความเหนียวหรือความทนทานต่อการแตกหักในระดับจุลภาคของวัสดุในการต้านทานการสึกหรอ



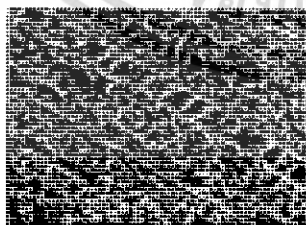
รูปที่ 2.5 ภาพถ่ายระดับจุลภาคแสดงการฝังตัวของอนุภาคซิลิกอนคาร์ไบด์บนผิวหน้าของพอลิยูรีเทนหลังจากการทดสอบการสึกกร่อนเนื่องจากการปะทะของอนุภาคแข็ง



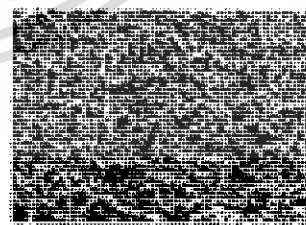
(ก)



(ข)



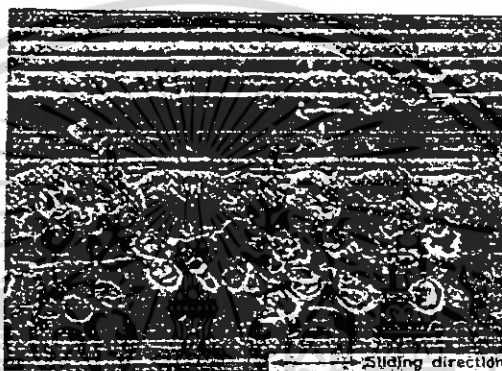
(ค)



(ง)

รูปที่ 2.6 การสึกหรอของ (ก) UHMWPE (ข) พอลิเอทิลีน-อิมิด (Torlon 4301) (ค) พอลิคาร์บอเนตและ (ง) พอลิยูรีเทน (Polycast 885) ภายหลังจากการทดสอบการสึกหรอแบบขัดถู

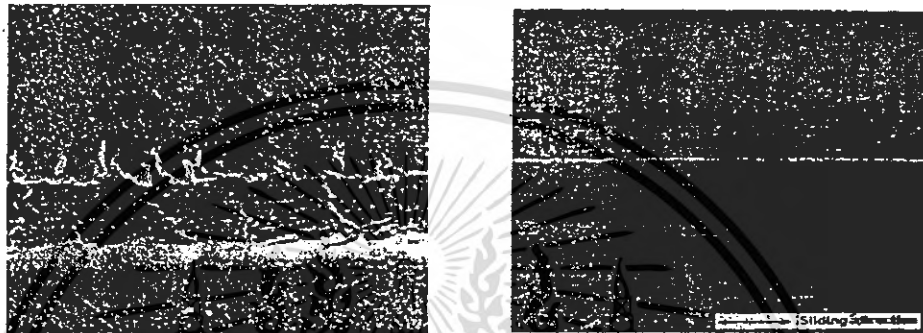
ในทำนองเดียวกันการทดสอบการสึกหรอด้วยการขัดถูก็แสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งแรงความสามารถในการยึดตัว และความต้านทานการสึกหรอ นั่นคือ พอลิเมอร์ที่มีความแข็งแรงและเปราะ เช่น พอลิอะซิโตน พอลิเอมีด-อิมิด และพอลิคาร์บอเนต จะต้านทานการสึกหรอแบบขัดถูได้น้อยกว่าพอลิเมอร์ที่มีความอ่อนนุ่มและเหนียวแบบพอลิเอทิลีนซึ่งจะมีการสึกหรอแบบเหนียว ในขณะที่พอลิเมอร์ที่แข็งแรงเหล่านั้นจะสึกหรอแบบเปราะ สำหรับพอลิยูรีเทนซึ่งมีความเหนียวคล้ายยางก็มีความสามารถในการต้านทานการสึกหรอแบบนี้ได้ดีเช่นเดียวกับพอลิเอทิลีน รูปที่ 2.6 แสดงถึงการสึกหรอของพอลิเมอร์ชนิดต่างๆ ภายหลังจากการขัดถู



รูปที่ 2.7 การสึกหรอของ PEEK ภายหลังจากการทดสอบการสึกหรอแบบไถล

สำหรับการทดสอบการสึกหรอแบบไถลพบว่า พอลิเอทิลีนชนิดที่ผ่านการเผาซินเทอร์สองระดับ(Double-sintered UHMWPE หรือ DSUHMWPE)จะมีคุณสมบัติที่เด่นที่สุดเนื่องจากการสึกหรอน้อยมากคือ  $7.06 \times 10^{-9}$  ลูกบาศก์มิลลิเมตร/นิวตันเมตร โดยทั่วไปการเติมสารเติมแต่ง(Additives) เช่น โมลิบดีนัมไดซัลไฟด์ (MoS<sub>2</sub>) จะช่วยปรับปรุงพฤติกรรมการสึกหรอแบบไถลของพอลิเมอร์หลายชนิด นอกจากนี้การเติมตัวเติม (Filler) บางชนิดก็สามารถปรับปรุงคุณสมบัติการสึกหรอได้เช่นกัน ยกตัวอย่างเช่น PEEK ซึ่งมีค่าการสึกหรอประมาณ  $1.24 \times 10^{-4}$  ลูกบาศก์มิลลิเมตร/นิวตันเมตร แต่เมื่อเติมคาร์บอนในปริมาณ 30% และเส้นใยบางชนิดลงไปพบว่าค่าการสึกหรอของ PEEK ลดลงเป็น  $14.75 \times 10^{-6}$  ลูกบาศก์มิลลิเมตร/นิวตันเมตร จากผลดังกล่าว แสดงว่าการเติมตัวเติมมีบทบาทสำคัญถึงแม้ว่าจากรูปถ่ายในระดับจุลภาคในรูปที่ 2.7 จะพบว่าแรงยึดเหนี่ยวระหว่างพื้นผิวของ PEEK และตัวเติมจะไม่ดีแต่ก็สามารถปกป้องเนื้อหลักหรือ PEEK จากการสึกหรอได้ นอกจากนี้ยังพบว่ายังไม่มีความสัมพันธ์ที่แน่ชัดระหว่างสมบัติเชิงกลและการสึกหรอ แต่อย่างไรก็ตาม จากการตรวจสอบสภาพพื้นผิวในรูปที่ 2.8 พบว่าพอลิเมอร์ที่มีความเปราะ เช่น พอลิอะซิโตน จะมีพื้นผิวภายหลังการสึกหรอที่หยาบ ในขณะที่พื้นผิวหลังการทดสอบของพอลิเมอร์ที่มีความเหนียว เช่น พอลิเอทิลีน จะมีความเรียบและสม่ำเสมอ และจากการตรวจสอบผิวของคู่สัมผัส (โลหะ) ภายหลังจากการสึกหรอในรูปที่ 2.9 พบว่า

พฤติกรรมการสึกหรอของพอลิเมอร์จะดีขึ้นถ้ามีการเกิดชั้นฟิล์มบางๆ ของพอลิเมอร์บนพื้นผิวโลหะที่เป็นคู่สัมผัส หรือการที่ร่องหลุมบนผิวโลหะถูกพอลิเมอร์เข้าไปอุดอยู่ ทำให้ผิวโลหะมีความเรียบขึ้น ภายหลังจากการทดสอบ เช่นที่เกิดบนผิวโลหะเมื่อเสียดสีคู่กับวัสดุพอลิเอมีด-อิมิด ซึ่งทำให้ผิวหน้าของโลหะเปลี่ยนแปลงไปโดยการไปทำให้รอยบากเริ่มต้นบนผิวหน้าของโลหะหายไปภายหลังจากการขัดถูหรือทดสอบ



รูปที่ 2.8 การสึกหรอของ (ก) พอลิอะซิโตน และ (ข) UHMWPE ภายหลังจากการทดสอบการสึกหรอแบบไถล



รูปที่ 2.9 ภาพถ่ายในระดับจุลภาคจากกล้อง SEM แสดงผิวหน้าของคู่สัมผัสที่เป็นเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 431 ภายหลังจากการทดสอบการสึกหรอของพอลิเอมีด-อิมิด (Torlon 4301) ด้วยเครื่องทดสอบการสึกหรอแบบไถล

จากการทดสอบการสึกหรอของพอลิเมอร์ทั้ง 24 ชนิดด้วยวิธีการ 4 วิธีกล่าวมาอาจกล่าวได้ว่า ถึงแม้ว่ากลไกการสึกหรอของพอลิเมอร์ที่ตรวจสอบจากภาพถ่ายในระดับจุลภาคจะแตกต่างกันไปตาม ชนิดของพอลิเมอร์แต่พอลิเมอร์แต่ละชนิดก็มีความสัมพันธ์ระหว่างความสามารถในการต้านทานการสึกหรอและคุณสมบัติเชิงกลไปในแนวทางเดียวกัน คือ ความสามารถในการต้านทานการสึกหรอจะเพิ่มขึ้นเมื่อความแข็งของพอลิเมอร์ลดลง ในขณะที่ความเหนียวในระดับจุลภาคซึ่งวัดได้จากค่าความสามารถในการยึดดึงจะมีค่าแปรผันตามความสามารถในการต้านทานการสึกหรอ กล่าวคือ พอลิเมอร์ที่สามารถต้านทานการสึกหรอได้ดีจะมีความเหนียวหรือความสามารถในการยึดดึงที่สูงนั่นเอง

2.9 เครื่องมือทดสอบมาตรฐาน

สำหรับเครื่องทดสอบการสึกหรอและความเสียดทาน ได้มีการคาดเดาไว้ว่าน่าจะมีประมาณกว่า 300 เครื่อง ที่ถูกพัฒนาขึ้นเพื่อใช้วัดและศึกษาความสามารถในการต้านทานการสึกหรอของชิ้นงานจากเครื่องที่ถูกพัฒนาขึ้นมาเหล่านี้ เครื่องทดสอบแบบ Pin-On-Disk ดูเหมือนจะเป็นแบบที่นิยมใช้กันมากที่สุด โดยเฉพาะสำหรับใช้ในการทดสอบวัสดุประเภทเซรามิกและทดสอบผิวเคลือบ นอกจากนี้ ก็มีเครื่องทดสอบแบบ Pin-On-Plate สำหรับศึกษาการสึกหรอในกระบอกสูบและแหวนลูกสูบในเครื่องยนต์ IC (เครื่องยนต์เผาไหม้ภายใน) และเครื่องทดสอบแบบ Block-On-Ring สำหรับทดสอบวัสดุที่ใช้ทำลูกปืน ปัจจุบันได้มีเครื่องมือทดสอบแบบ “ครอยจักรวาล” ออกมาจำหน่ายอยู่หลายประเภทที่มีความเชื่อถือได้และการทำซ้ำได้สูง ซึ่งเครื่องมือดังกล่าวก็จะสามารถทดสอบในแบบต่างๆ 3 แบบที่กล่าวมาได้ในเครื่องเดียวกัน เครื่องมือเหล่านี้ถูกออกแบบมาเพื่อทดสอบการสึกหรอทั้งแบบแห้งและแบบที่มีสารหล่อลื่นของวัสดุหลากหลายประเภท และยังสามารถใช้ทดสอบการสึกหรอแบบขัดถูได้ในระดับหนึ่งด้วย ตัวอย่างของเครื่องมือทดสอบบางประเภทที่เป็นที่ยอมรับได้แสดงไว้ต่อไปนี้ โดยแบ่งตามประเภทของการสึกหรอ คือ การสึกหรอแบบขัดถู การสึกหรอของโลหะบนโลหะ และการสึกหรอแบบอื่นๆ

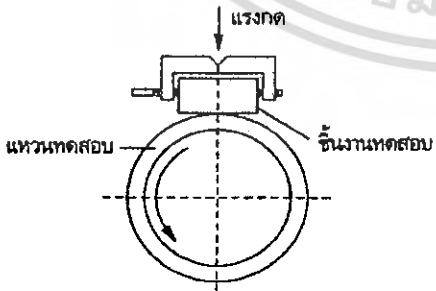
2.9.1 การสึกหรอแบบขัดถู (Abrasive)

	<p>การทดสอบแบบ Pin-on-Disk เป็นกลุ่มที่นิยมใช้ในห้องทดสอบมากที่สุด ชั้น ในการทดสอบอยู่ในรูปแท่ง (Pin) ซึ่งจะทดสอบคู่ในรูปวัสดุที่อ้างอิง (ในรูปแท่งอีกเช่นกัน) โดยเคลื่อนที่ขณะสัมผัสอยู่บนกระดานทดสอบการขัดถู แท่งทดสอบจะถูกจัดให้เคลื่อนที่ในลักษณะที่ร่องสึกจะตั้งไม่ซ้อนทับกัน ในการจัดวางแบบ Pin-on-Disk ร่องสึกจะต้องขัดเป็นเกลียว ผู้ใช้สามารถปรับแรงกดความเร็วและเวลาในการทดสอบให้เหมาะสมได้ หลังการทดสอบจะต้องชั่งน้ำหนักที่หายไปของทั้ง Pin และ Disk</p>
	<p>Pin-on-Drum เป็นการทดสอบที่คล้ายกับ Pin-on-Disk แต่การสัมผัสระหว่างวัสดุทดสอบ (Pin) บนผิวโค้งของ Drum ร่องสึกจะเป็นวงคล้ายสปริงตามทิศทางการเคลื่อนที่ของ Pin เนื่องจากการทดสอบแบบ Pin ไม่มีความใกล้เคียงกับสถานการณ์จริงนัก จึงนิยมใช้เพียงสำหรับศึกษาเปรียบเทียบกลไกและความต้านทานการสึกหรอของวัสดุต่างๆ เท่านั้น</p>

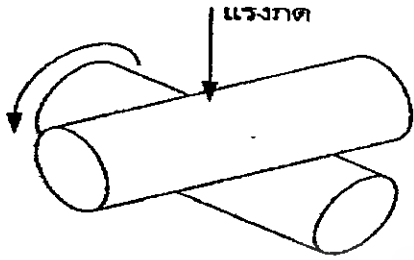
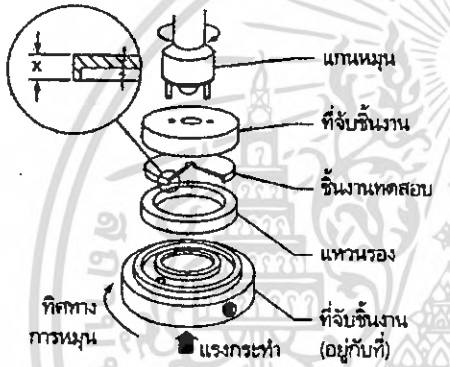
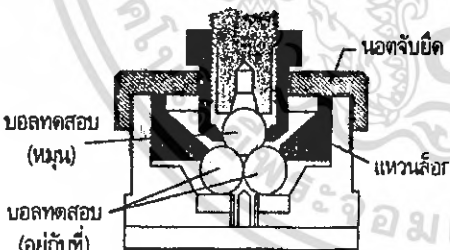
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

 <p>Dry Sand/Rubber Wheel Test</p>	<p>Dry Sand/Rubber Wheel เป็นการทดสอบอีกแบบหนึ่งที่ได้รับคามนิยมในการทดสอบการสึกหรอของทั้งชิ้นงานและผิวเคลือบ ชิ้นงานทดสอบจะอยู่ในรูปของก้อนสี่เหลี่ยมซึ่งถูกกดเข้ากับล้อยางที่หมุนอยู่ระหว่างชิ้นงานและล้อยาง เมื่อครบเวลาที่กำหนดจึงนำชิ้นงานไปชั่งน้ำหนักที่หายไปเพื่อหาปริมาณการสึกหรอที่เกิดขึ้น</p>
 <p>Wet Rail Abrasion Test</p>	<p>การทดสอบแบบ Wet Rail Abrasion มีความคล้ายคลึงกับ Dry Sand/Rubber Wheel อยู่มากแต่ชิ้นงานที่กดไว้กับล้อยางจะถูกจุ่มอยู่ใน Slurry ที่มีทรายแขวนลอยไว้ ทำให้การทดสอบเหมาะกับงานที่อยู่ในสภาวะการใช้งานจริงมีของเหลวเข้ามาเกี่ยวข้อง ความแข็งของล้อยางที่ใช้จะมีผลต่อการทดสอบที่ได้ ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญตัวหนึ่งในการทดสอบ</p>

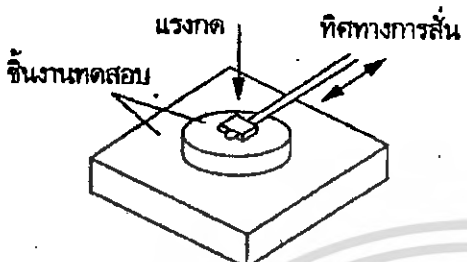
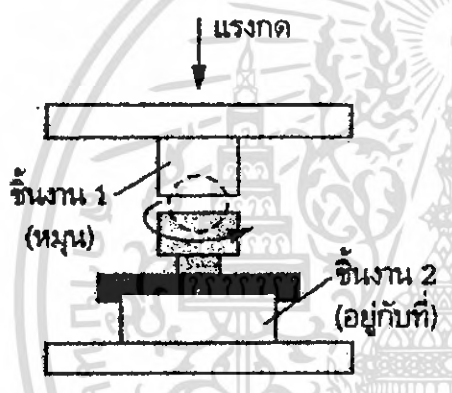
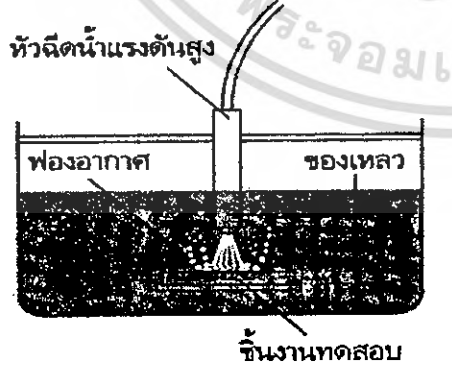
2.9.2 การสึกหรอของโลหะบนโลหะ

 <p>Block-On-Ring</p>	<p>ในการทดสอบแบบ Block-on-ring ชิ้นงานทดสอบในรูปของก้อนสี่เหลี่ยมที่อยู่ที่จะถูกกดเข้ากับแหวนทดสอบที่หมุนอยู่ที่ความเร็วซึ่งกำหนดได้ ปริมาณการสึกหรอบนชิ้นงานทดสอบวัดได้จากความกว้างของความสึกซึ่งสามารถเทียบออกมาเป็นปริมาตรที่หายไปและการสึกหรอของวงแหวนทดสอบวัดได้จากการชั่งน้ำหนักแล้วเอาค่าที่ได้คำนวณออกมาเป็นปริมาตรที่หายไปวิธีนี้สามารถนำมาทดสอบวัสดุได้หลายประเภท รวมทั้ง โลหะ เซรามิก พอลิเมอร์ และผิวเคลือบประเภทต่างๆ</p>
--	--

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

 <p style="text-align: center;">Crossed-Cylinder Test</p>	<p>การทดสอบแบบ Crossed-Cylinder เป็นการทดสอบที่สามารถใช้วัดอัตราการสึกหรอของเหล็กกล้าเครื่องมือ (Tool steel เช่น วัสดุที่ใช้เป็นแม่พิมพ์ตัดปั๊มขึ้นรูปเป็นต้น) และอัลลอยแข็งหลายประเภท ซึ่งมีการทดสอบเพียงไม่กี่ประเภทที่สามารถวัดได้โดยไม่ใช้เวลานานมาก จึงเป็นวิธีทดสอบที่นิยมใช้ในบริษัทผลิตเหล็กกล้าและอัลลอยในการวัดการสึกหรอระหว่างโลหะด้วยกันเพื่อเปรียบเทียบและพัฒนาคุณสมบัติของโลหะ</p>
 <p style="text-align: center;">Thrust Washer Test</p>	<p>การทดสอบแบบ Thrust Washer เป็นวิธีการวัดอัตราการสึกหรอและค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานของวัสดุหล่อลื่นในตัวเอง (Self-lubricating materials เช่น กราไฟต์ เทฟลอน MoS<sub>2</sub> เป็นต้น) ในการทดสอบแหวนรอง (Washer) ที่ไม่หมุนจะถูกดันขึ้นไปสัมผัสกับชิ้นงานทดสอบที่หมุนอยู่เมื่อครบช่วงเวลาที่กำหนด จึงนำชิ้นงานและแหวนรองออกมาวัดความหนาที่หายไปเพื่อคำนวณอัตราการสึกหรอที่เกิดขึ้น</p>
 <p style="text-align: center;">Four-Ball Test</p>	<p>การทดสอบแบบ Four-ball เป็นการทดสอบเพื่อวัดความสามารถในการต้านทานการสึกหรอของสารหล่อลื่น ลูกบอลทดสอบที่ใช้จึงกำหนดเป็นเหล็กกล้าทั้งหมด ในการทดสอบ ลูกบอลด้านบนที่เคลือบไว้ด้วยสารหล่อลื่นจนทั่วจะหมุนรอบตัวขณะที่ถูกกดลงบนลูกบอลอีก 3 ลูกที่อยู่กับที่ด้านล่าง เมื่อครบเวลาที่กำหนดจึงถอดลูกบอลออกเพื่อวัดความยาวเส้นผ่านศูนย์กลางของรอยสึกบนลูกบอลที่อยู่อยู่กับที่ทั้ง 3 ลูกแล้วนำมาคำนวณหาปริมาณการสึกหรอ</p>

2.9.3 การทดสอบการสึกหรอแบบอื่นๆ

 <p>Flat Rider-On-Flat</p>	<p>การทดสอบการสึกหรอแบบ Fretting มีหลายลักษณะ เครื่องมือส่วนมากจะจัดวางคล้ายคลึงเครื่องทดสอบการสึกหรอแบบขัดถูและการสึกหรอของโลหะบนโลหะ เช่น Flat-on-flat (ในภาพ) Block-on-ring และ Cylinder-on-flat เป็นต้น เพียงแต่เพิ่มการสั่นแบบ Oscillation เข้าไปเพื่อจำลองการสึกหรอแบบ Fretting</p>
 <p>Galling Test</p>	<p>การทดสอบแบบ Galling เป็นการทดสอบเพื่อเปรียบเทียบความต้านทานการสึกหรอแบบ Galling ระหว่างโลหะ รวมทั้งผิวเคลือบและวัสดุประเภทอื่น ชิ้นส่วนที่ใช้ในการทดสอบมี 2 ส่วนด้วยกัน คือ ชิ้นส่วน 1 (Button) จัดวางไว้ด้านบน ซึ่งจะหมุนรอบแกนกลาง ผิวเรียบของชิ้นงาน 1 จะวางประกบบนชิ้นงาน 2 (Block) ที่ยึดอยู่กับที่ไว้ด้านล่าง สภาพการทดสอบจะเป็นแบบไม่มีการหล่อลื่น เนื่องจากเกิด Galling ในชิ้นงานจริงส่วนใหญ่จะเป็นในสถานะแห้ง ชิ้นงานจะทดสอบเป็นช่วงๆ และหยุดเพื่อหาร่องรอยการเกิด Galling ด้วยตาเปล่า หากยังไม่เกิดก็จะดำเนินต่อไป</p>
 <p>Cavitation Erosion Test</p>	<p>การทดสอบแบบ Cavitation Erosion เป็นการทดสอบเพื่อเปรียบเทียบความต้านทานการเกิด Cavitation erosion ของวัสดุต่างๆ นิยมปฏิบัติในขั้นตอนการเลือกใช้วัสดุสำหรับปั๊ม ท่อน้ำ ฯลฯ ชิ้นงานทดสอบจะถูกยึดอยู่กับที่ไว้ด้านล่างในอ่างของเหลวที่ต้องการศึกษา (น้ำ สารละลายกรด ต่าง เป็นต้น) หัวฉีดน้ำลงบนชิ้นทดสอบให้เกิดฟองอากาศจำนวนมากบริเวณผิวชิ้นงาน เมื่อครบกำหนดเวลาทดสอบจึงนำชิ้นงานออกมาศึกษาปริมาณความเสียหายที่เกิดขึ้น</p>

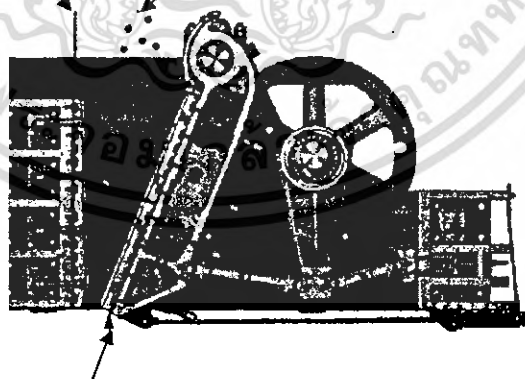
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากตัวอย่างที่กล่าวมานี้ เราจะพบว่า การทดสอบการสึกหรอมีให้เลือกใช้ได้หลายประเภท ซึ่งแต่ละเทคนิคก็มีข้อจำกัดที่แตกต่างกันไป การเลือกใช้ควรทำด้วยความรอบคอบ การตีความหมายของผลการทดสอบก็ต้องทำโดยคำนึงไว้เสมอว่าการทดสอบไม่สามารถจำลองสถานการณ์จริงได้อย่างเที่ยงตรงนัก นอกจากนี้ ถึงแม้ว่าการทดสอบเหล่านี้จะมีมาตรฐานการทดสอบให้ปฏิบัติตาม (เช่น ASTM) แต่ก็มีควมคลาดเคลื่อนเกิดขึ้นอยู่มาก ทั้งจากเครื่องมือทดสอบ การเตรียมชิ้นงาน และจากผู้ใช้เองด้วย ยกตัวอย่าง เช่น ในการทดสอบแบบ Galling การตัดสินใจว่าการสึกหรอหรือไม่จะขึ้นอยู่กับวิจารณญาณของผู้ทดสอบเอง ซึ่งก็แตกต่างกันไปจากผู้ใช้คนหนึ่งสู่อีกคนหนึ่ง หรือแม้แต่ในคนเดียวก็ตาม เนื่องจากไม่มีเกณฑ์วัดออกมาเป็นตัวเลขที่แน่นอน ดังนั้น โดยส่วนใหญ่การทดสอบการสึกหรอจึงใช้เป็นเพียงเครื่องมือเพื่อเปรียบเทียบคุณสมบัติของแต่ละวัสดุเท่านั้น

### 2.10 ปัญหาอื่นๆ ของการทดสอบการสึกหรอแบบขัดถู

ด้วยลักษณะที่หลากหลายของการสึกหรอแบบขัดถู จึงได้เกิดปัญหาต่างๆ ขึ้นมามากมาย ทั้งในเรื่องการจัดประเภท และในเรื่องของการทดสอบ งานวิจัยและพัฒนาในสาขา Tribology ในระยะเวลา 30 ปีที่ผ่านมาส่วนใหญ่มุ่งไปที่การประดิษฐ์และสร้างเครื่องมือเพื่อใช้วัดความต้านทานการสึกหรอแบบขัดถูประเภทต่างๆ โดยเฉพาะแบบการสึกหรอขั้นรุนแรง การสึกหรอที่ความเค้นสูง และการสึกกร่อน (การสึกหรอที่ความเค้นต่ำ) และหลังจากนั้นก็มีการพัฒนาเครื่องสำหรับทดสอบการสึกหรอแบบขัดถูจากการกระแทก (Impact abrasion) ตามมา

แผ่นชิ้นงานทดสอบอยู่กับที่      หิน Abrasive (ขนาดตามมาตรฐาน)



แผ่นเหล็กกล้า เป็นวัสดุอ้างอิงเคลื่อนที่เพื่อבחหิน

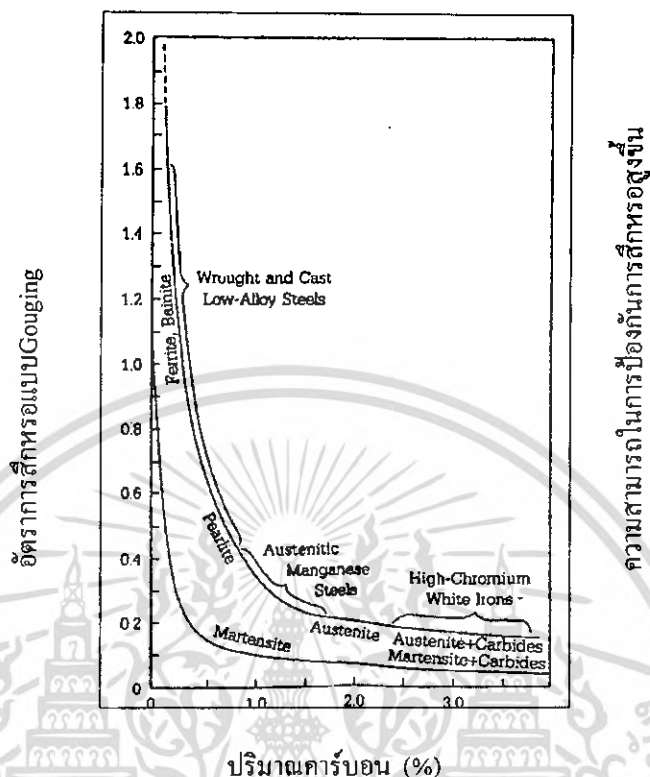
รูปที่ 2.10 เครื่องย่อยหินขนาดห้องทดสอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.10.1 การสึกหรอขั้นรุนแรง (Gouging)

การสึกหรอขั้นรุนแรง หรือการสึกหรอแบบ Gouging นั้นเป็นแบบจำลองที่จำลองการทดลองขนาดเล็กได้ยาก จึงได้มีการนำวิธีการอื่นเข้ามาใช้ วิธีแรกเป็นการนำเครื่องขอยหินขนาดห้องทดลองมาใช้ และวิธีที่สอง ใช้จานหมุนสำหรับขัดดู (Abrasive grinding wheel test) โดยมีชิ้นงานทดสอบกดลงบนจานในลักษณะคล้ายเบรก การใช้งานขัดในลักษณะนี้สามารถให้การทำซ้ำได้ที่ตีมาก แต่ในการทดสอบไม่ได้มีการกระแทก (Impact) เข้ามาเกี่ยวข้องซึ่งเป็นกลไกที่สำคัญตัวหนึ่งในการสึกหรอที่เกิดขึ้นระหว่างการใช้งานจริง ผลการทดสอบจึงไม่สามารถเป็นตัวแทนการสึกหรอจริงได้ ดังนั้น การทดสอบประเภทนี้จึงไม่นิยมใช้อีกต่อไป

สำหรับเครื่องทดสอบประเภทเครื่องขอยหินขนาดห้องทดลอง ก็มีหลายแบบที่ใช้ในการทดลองได้ การจัดวางโดยทั่วไปจะมีชิ้นงานในรูปของแผ่นทดสอบที่ถูกยึดอยู่กับที่ ซึ่งจะมีแผ่นวัสดุอ้างอิงที่มักจะทำจากเหล็กกล้ามาประกบคู่อยู่ แผ่นเหล็กกล้านี้จะเคลื่อนที่เป็นมุมเข้าออกจากแผ่นทดสอบคล้ายการเคี้ยวเพื่อขอยหิน (ดูรูปที่ 2.10 ประกอบ) หินขัดดูขนาดมาตรฐานซึ่งมีซิลิกาปนอยู่ (Siliceous rock) ที่นำมาใช้ในการทดสอบก็จะมีขนาด (เส้นผ่านศูนย์กลางไม่เกินประมาณ 50 มิลลิเมตร) และมีปริมาณที่ต้องใช้ตามมาตรฐาน ASTM G81 เมื่อขอยหินตามปริมาณที่กำหนดแล้วจึงนำเอาแผ่นชิ้นงานและแผ่นอ้างอิงมาชั่งหาน้ำหนักที่หายไป เพื่อหา “อัตราของการสึกหรอแบบ Gouging” ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนดังกล่าวกับปริมาณคาร์บอนในเหล็กอัลลอย และกับความแข็งของผิวที่ผ่านการทำให้แข็งด้วยความเครียดได้แสดงไว้ในรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.11 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนของการสึกกร่อนแบบ Gouging กับปริมาณคาร์บอนในเหล็กอัลลอย และกับความแข็งของผิวที่ผ่านการทำให้แข็งด้วยความเครียด

งานวิจัยที่ผ่านมาได้แสดงให้เห็นว่าเหล็กหล่อขาวผสม (Alloy white iron) มีความสามารถในการต้านทานการสึกกร่อนที่ดีกว่าเหล็กกล้าชุบแข็งแม้แต่ในกรณีที่ค่าความแข็งของเนื้อเหล็กกล้านั้นเทียบเท่าได้กับเหล็กหล่อขาว ซึ่งผลการทดลองนี้มีความหมายทั่วไปว่า วัสดุที่มีเฟสแข็งของคาร์ไบด์จะสามารถป้องกันการสึกกร่อนได้ดีกว่าเหล็กกล้าที่มีความแข็งสูงภายใต้สภาวะการสึกกร่อนแบบ Gouging แต่ข้อสรุปนี้อาจจะไม่เป็นจริงเสมอไปในสถานการณ์การสึกกร่อนของอุตสาหกรรม เหตุการณ์อย่างกรณีนี้ก็เกิดขึ้นอีกเช่นกันเมื่อมาศึกษาข้อมูลจากการทดสอบการสึกกร่อนแบบขัดถูที่ค่าความเค้นสูง

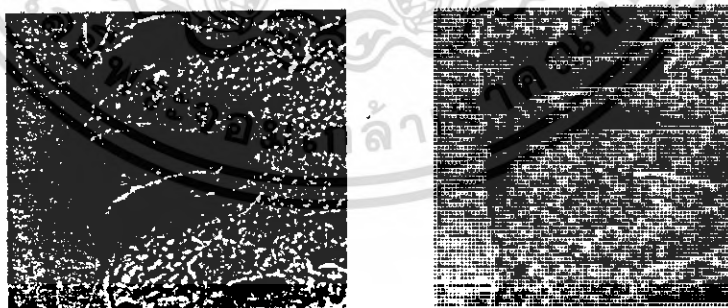
#### 2.10.2 การสึกกร่อนแบบขัดถูที่ค่าความเค้นสูง (High Stress Abrasion หรือ Grinding Abrasion)

การทดสอบการสึกกร่อนแบบขัดถูที่ค่าความเค้นสูงได้รับความสนใจเป็นอย่างมาก เนื่องจากอัตราการสึกกร่อนที่สูงมากในเครื่องจักรอุปกรณ์ เช่น เครื่องบดทั้งแบบทรงกระบอกและแบบลูกกลิ้ง การทดสอบส่วนใหญ่จะใช้เทคนิคการทำเครื่องหมายลงบนลูกบดและทดสอบโดยใช้เครื่องบดอุตสาหกรรมในช่วงเวลาสั้นๆ (Short-time marked-ball testing) ซึ่งผลการทดลองก็สามารถแสดงถึงประสิทธิภาพการใช้งานจริงของชิ้นส่วนอุปกรณ์ในระยะยาวได้เป็นอย่างดี อย่างไรก็ตาม การทดลอง “ระยะสั้น” ที่ว่านี้ก็ยัง

ต้องใช้เวลาทดสอบหลายอาทิตย์และมีปัญหาปลีกย่อยตามมาอีก เช่น เทคนิคการทำเครื่องหมายบนลูกบิด การหาลูกบิดที่ทำเครื่องหมายไว้ให้เจอเมื่อหยุดเครื่องเพื่อเก็บผลการทดลอง และที่สำคัญความเสียหายต่อการผลิตเมื่อต้องนำเครื่องจักรมาทำการทดลองจากที่กล่าวมา จึงเกิดความต้องการเครื่องมือทดสอบสำหรับห้องทดลองที่เชื่อถือได้ขึ้น เครื่องมือที่ถูกพัฒนาขึ้นมาแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภท คือ

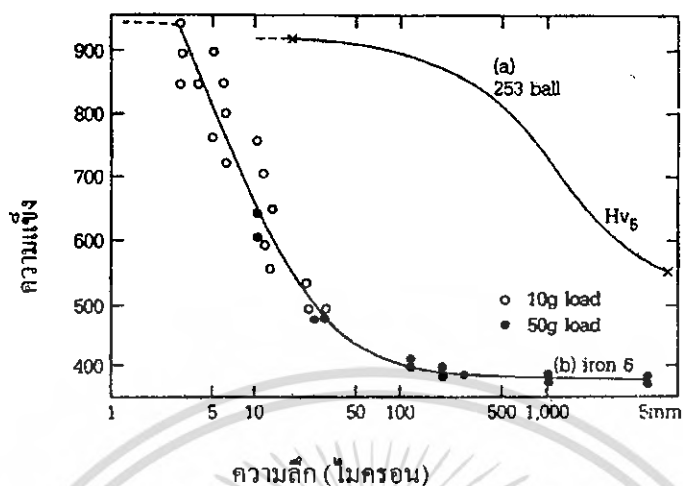
1. ประเภทที่ใช้ชิ้นงานเป็นแท่งกลดบนผ้าขัด (Pin-on-plate test) แต่การทดสอบลักษณะนี้ก็ไม่ใช้การทดสอบแบบขัดที่ค่าความเค้นสูงเสียวทีเดียว เนื่องจากว่าตัวกลางในการขัด (Abrasive media) ถูกหมุนด้านหนึ่งไว้โดยผ้าขัดและไม่ถูกขัดอยู่ระหว่าง 2 ผิวโลหะ ดังนั้น การทดสอบลักษณะนี้จะเน้นการสึกหรอแบบตัดเฉือน (Cutting) แทนที่จะเป็นการสึกหรอจากการเปลี่ยนรูปร่างอย่างถาวร (Deformation wear)

2. ประเภทที่ชิ้นงานถูกโกลไปบนลู่วงกลม ในขณะที่ทั้งชิ้นงานและลู่วงอยู่ในผงขัดแห้งหรือ ผงขัดเปียก (Dry loose abrasive material หรือ Abrasive slurry) ในการทดสอบลักษณะนี้ชิ้นงานก็จะได้รับแรงกระทำที่เพียงพอที่จะทำให้อนุภาคผงขัดแตกออก และการสึกหรอที่เกิดขึ้นจะเป็นทั้งแบบตัดเฉือนและแบบการเปลี่ยนรูปร่าง ร่องรอยของการสึกหรอที่เกิดขึ้นจะมีลักษณะคล้ายกับที่เห็นบนชิ้นส่วนที่สึกหรอจากการใช้งาน เช่น ร่องรอยของการทำให้แข็งด้วยความเครียด (Work hardening) การเปลี่ยนแปลงทางโครงสร้างของวัสดุและรอยแตกภายในเนื้อวัสดุบริเวณรอยต่อระหว่างเฟส โดยเฉพาะในวัสดุที่มีเฟสยูเทกติกของสารประกอบคาร์ไบด์ (Eutectic carbide) ซึ่งมีความแข็งสูง รูปที่ 2.12 แสดงภาคตัดขวางของชิ้นงานที่ผ่านการทดสอบการสึกหรอแบบโกลไปบนลู่วง ความเสียหายเกิดขึ้นจากรอยแตกบริเวณเฟสของคาร์ไบด์อย่างรุนแรง แต่ระยะความแข็งสึกจากความเครียดในเฟสออสเทนไนต์ นั้นน้อยกว่าความสึกที่เกิดขึ้นจากการใช้งานจริงมาก (ดูรูปที่ 2.13 ประกอบ) สรุปได้ว่าการจำลองสภาวะการทำงานของเครื่องบดให้เหมือนจริงเป็นโจทย์ที่ยากมาก ดังนั้น การนำผลจากการทดลองในเครื่องทดสอบมาใช้จึงต้องทำโดยมีความเข้าใจในกระบวนการต่างๆ ที่เกิดขึ้นระหว่างการทดสอบดีพอเท่านั้น



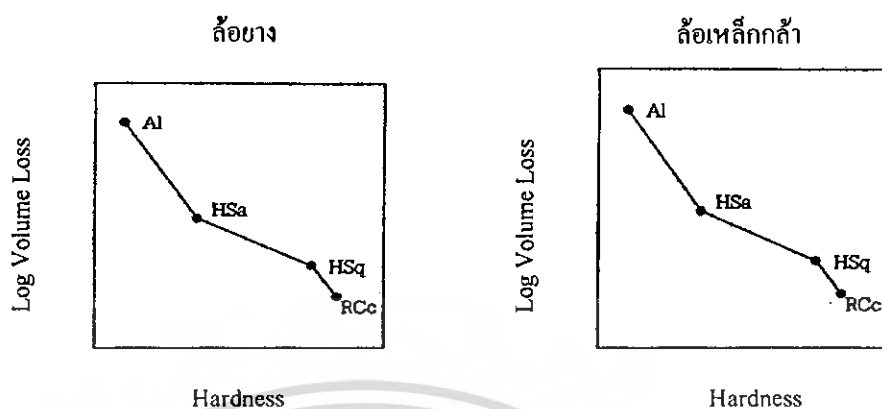
รูปที่ 2.12 ภาคตัดขวางของชิ้นงานแสดงถึงรอยแตก M<sub>7</sub>C<sub>3</sub> ยูเทกติกคาร์ไบด์ และช่องว่าง ณ บริเวณรอยต่อ (Void) ระหว่างเนื้อหลักและเฟสของคาร์ไบด์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.13 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งและความลึกจากผิวด้านนอกเข้าไปในเนื้อวัสดุ

การทดสอบการสึกหรออีกอย่างหนึ่งที่ได้รับการยอมรับจนกลายเป็นหนึ่งในมาตรฐานของการทดสอบ คือ การทดสอบการสึกหรอแบบชัคดูประเภท Dry sand/rubber wheel แต่ว่าผลการทดสอบอาจมีความเชื่อถือต่ำเมื่อนำมาทดสอบชิ้นงานเหล็กอัลลอยที่มีความแข็งสูง เช่น เหล็กที่มีส่วนผสมของ Cr สูง กล่าวคือ จะให้ค่าความต้านทานการสึกหรอที่ต่ำกว่าความเป็นจริง ในทางกลับกัน ถ้าหากขางที่ใช้ทดสอบถูกเปลี่ยนไปเป็นล้อเหล็กกล้าซึ่งแข็งกว่ามาก ผลการทดสอบบนชิ้นงานเดียวกันที่ได้กลับให้ค่าความต้านทานการสึกหรอที่ต่ำกว่าความเป็นจริงมาก (ดูรูปที่ 2.14 ประกอบ) ความแตกต่างของความเสียดทานระหว่างผิว ประกอบกับการแตกออกเป็นเศษของเม็ดทรายเป็นสาเหตุให้ผลของความต้านทานการสึกหรอแบบชัคดูที่ได้จากเหล็กหล่อขาว มีค่าใกล้เคียงกับอะลูมิเนียมเมื่อนำล้อเหล็กกล้ามาใช้ในการทดสอบ



รูปที่ 2.14 ความแตกต่างระหว่างอัตราการสึกหรอ (Volume loss) ของวัสดุทดสอบที่มีค่าความแข็งต่างๆ เมื่อนำมาทดสอบแบบ Dry-sand rubber wheel โดยใช้ล้อยางและล้อเหล็กกล้าในการทดสอบ

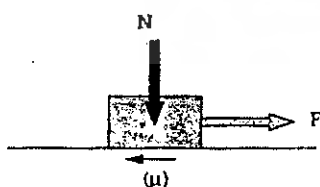
ทั้งการทดสอบแบบ Rubber wheel และแบบ Pin-on-plate ต่างก็คาดคะเนความสามารถในการต้านทานการสึกหรอของเหล็กอัลลอย (ความแข็งสูง) จนเกินความเป็นจริงไป ตามผลการทดสอบเหล็กหล่อสีขาวผสมควรจะมีความสามารถในการต้านทานการสึกหรอที่ดีกว่าเหล็กกล้าเพิร์ลไลต์ถึง 600% แต่ในการใช้งานจริงกลับพบว่าค่าดังกล่าวนั้นเพิ่มขึ้นเพียง 32 % เท่านั้น ปัญหาที่ขัดแย้งกับหลักการในลักษณะนี้ทำให้เกิดการพัฒนาเครื่องมือทดสอบการสึกหรอแบบขัดถูจากการกระแทก (Impact-wear tester) ที่กล่าวไว้ก่อนหน้านี้ แต่การกระแทกก็เป็นเพียงการให้แรงกระทำอีกวิธีหนึ่ง การทดสอบการสึกหรอแบบขัดถูจากการกระแทกที่พัฒนาขึ้นมาี้ดูเหมือนว่าจะไม่ได้ให้ข้อมูลด้านการสึกหรอมากไปกว่าการทดสอบวิธีอื่นๆ งานวิจัยในปัจจุบันจึงหันมาให้ความสนใจกับการทดสอบแบบใช้ลูกบด (Ball mill) ขนาดห้องทดลองแทน การทดสอบแบบลูกบดให้ความคล่องตัวสูง ทั้งในเรื่องของวัสดุและขนาดของลูกบด สามารถทดสอบวัสดุหลายชิ้นหลายประเภทได้ในครั้งเดียวและสามารถเลือกทดสอบได้ทั้งในสถานะเปียกหรือแห้งอีกด้วย จากผลการทดลองที่ได้จะพบว่าความแตกต่างของความต้านทานการสึกหรอระหว่างเหล็กกล้าและเหล็กหล่อขาวจะขึ้นอยู่กับลูกบดที่ใช้ในการทดสอบ

## 2.11 แรงเสียดทาน (Frictional forces)



รูปภาพที่ 2.15 แสดงลักษณะการเคลื่อนที่สัมพัทธ์แบบการไถลและแบบกลิ้ง

ความเสียดทานเป็นแรงต้านทานการเคลื่อนที่สัมพัทธ์ระหว่างผิว 2 ผิว ลักษณะของการเคลื่อนที่อาจจะเป็นการเลื่อนไถล(Sliding) หรือการกลิ้ง (Rolling) ของผิวหนึ่งไปบนอีกผิวหนึ่งซึ่งอาจจะสัมผัสกันโดยตรงหรือมีช่องเคลว หรือมีฟิล์มคั่นอยู่ระหว่างผิวที่มีการเคลื่อนที่สัมพัทธ์ ปัญหาสำคัญของความเสียดทาน คือ การที่มีความเสียดทานระหว่างผิววัสดุจะก่อให้เกิดการสูญเสียพลังงานของระบบเพื่อเอาชนะแรงเสียดทานหรือต้องใส่พลังงานให้แก่ระบบมากขึ้นเพื่อให้ระบบทำงานได้ พลังงานที่สูญเสียไปนี้เมื่อนำมารวมกันจะพบว่ามีมูลค่ามหาศาลทีเดียว การศึกษาโดยมุ่งเน้นที่การลดแรงเสียดทานจึงมีความสำคัญเป็นอย่างมากในวิทยาการสมัยใหม่ทั้งในการพัฒนาวัสดุที่มีค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานต่ำ และการออกแบบระบบให้เกิดความเสียดทานขึ้นน้อยที่สุด เป็นต้น แต่ในบางกรณีความเสียดทานก็เป็นที่ต้องการ เช่น การเดิน การขับเคลื่อนของรถยนต์ การหีบจับสิ่งของ ถ้าไม่มีความเสียดทานระหว่างผิว กิจกรรมต่างๆ เหล่านี้ก็จะเกิดขึ้นไม่ได้ ดังนั้น การศึกษาที่เกี่ยวข้องกับความเสียดทานจึงประกอบด้วยการศึกษาเพื่อลดความเสียดทานให้ต่ำที่สุด ในกรณีที่ไม่ต้องการและการศึกษาเพื่อรักษาค่าความเสียดทานให้เพียงพอกับความต้องการในการทำงานบางอย่าง นอกจากนี้ยังมีบางกรณีที่ต้องการศึกษาเพื่อรักษาค่าความเสียดทานในช่วงเวลาแคบๆ ให้สามารถควบคุมได้ เช่น ในระบบเบรกของรถยนต์ ซึ่งการทำงานของเบรกไม่ต้องการให้หยุดในทันที ต้องมีช่วงเวลาที่เหมาะสมในการหยุดของรถไม่ให้ช้าหรือเร็วจนเกินไปเพื่อความนุ่มนวลในการขับขี่ เป็นต้น



$$\mu = F/N$$

$\mu$  = ค่า สปส. ความเสียดทาน

$F$  = แรงที่ทำให้เคลื่อนที่

$N$  = แรงตั้งฉาก, น้ำหนัก

รูปที่ 2.16 แสดงการหาค่า สปส. ความเสียดทาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขนาดหรือระดับของค่าความเสียดทาน โดยทั่วไปเราใช้ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน( $\mu$ )เป็นตัววัด โดยค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานสามารถคำนวณหาได้ตามรูปที่ 2.16

### 2.11.1 ความเสียดทานแบบไถล (Sliding Friction)

ผู้ที่ได้รับการยกย่องว่าเป็นบุคคลแรกที่ค้นพบเรื่องความเสียดทาน คือ Leonardoda Vinci หลังจากนั้น Amonton ได้ทำการสังเกตและตั้งกฎพื้นฐานของความเสียดทานไว้ 2 ข้อ ซึ่งได้รับการกล่าวถึงและมีการนำไปอ้างอิงเป็นที่แพร่หลาย ต่อมากฎข้อที่ 3 ก็ได้ตั้งขึ้นตามมาจากการสังเกตของ Coulomb ซึ่งมีเนื้อหา ดังนี้ คือ

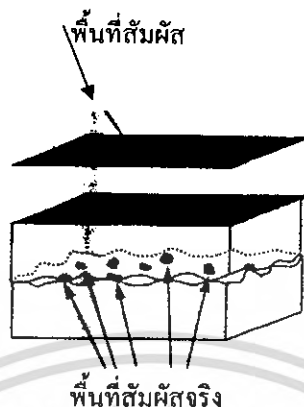
กฎข้อที่ 1 แรงเสียดทานเป็นสัดส่วนโดยตรงกับแรงตั้งฉาก( $F=\mu N$ )

กฎข้อที่ 2 ความเสียดทานไม่ขึ้นอยู่กับพื้นที่สัมผัส(Apparent area of contact)

กฎข้อที่ 3 แรงเสียดทานไม่ขึ้นอยู่กับความเร็วในการเคลื่อนที่สัมผัส

กฎข้อที่ 1 และข้อที่ 2 โดยทั่วไปเป็นที่ยอมรับ มีเพียงบางกรณีที่ไม่เป็นไปตามกฎ เช่น ในกรณีวัสดุที่แข็งมากๆ เช่นเพชร หรือกรณีที่วัสดุอ่อนนุ่มๆ เช่น PTFE (Teflon) พบว่าอาจจะเกิดความสัมพันธ์แบบยกกำลัง ( $F = CN^x$ ) ได้ นอกจากนี้ในกรณีวัสดุอ่อนนุ่มแต่มีฟิล์มแข็งเคลือบอยู่ ในสภาวะการทำงานที่มีค่าความเค้นต่ำฟิล์มแข็งที่เคลือบอยู่จะมีผลกับค่าแรงเสียดทานที่เกิดขึ้น จึงเป็นการวัดความเสียดทานระหว่างฟิล์มเคลือบกับวัสดุที่มากกระทำ แต่เมื่อความเค้นที่มากกระทำเพิ่มขึ้นจนถึงจุดที่ฟิล์มเคลือบแตก เนื้อของวัสดุภายในจะเป็นตัวที่มีอิทธิพลกับค่าความเสียดทานทำให้ค่าความเสียดทานเปลี่ยนไป ความสัมพันธ์ระหว่างแรงเสียดทานและแรงกดจึงเป็นไปตามกฎข้อที่ 2 คือกรณีที่มีผิวงานเรียบมากและสะอาดมากจะเกิดแรงยึดเหนี่ยวระหว่างผิวสัมผัสสูง จึงทำให้แรงเสียดทานไม่ขึ้นกับความเค้นที่มากกระทำแต่จะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับพื้นที่สัมผัส ในส่วนของกฎข้อที่ 3 มีการโต้แย้งกันมาก จากที่ทราบทั่วไปว่า ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานสถิต (Static friction coefficient :  $\mu_s$ ) มีค่าสูงกว่าค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานจลน์ (Kinetic friction coefficient :  $\mu_k$ ) โดยที่ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานสถิตจะมีค่าแปรตามช่วงเวลาในการสัมผัสกันของผิว 2 ผิวถ้าสัมผัสกันเป็นช่วงเวลาสั้นๆ  $\mu_s$  จะต่ำหรือมีค่าเทียบเท่ากับ  $\mu_k$  และเมื่อผิว 2 ผิวสัมผัสกันเป็นระยะเวลานานก่อนที่จะเกิดการเคลื่อนที่  $\mu_s$  จะสูงขึ้น ซึ่งเกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างแบบพลาสติก(Plastic flow)และการคืบของวัสดุในส่วนของ  $\mu_k$  มีการทดลองมากมายที่ยืนยันว่า  $\mu_k$  จะแปรตามความเร็วของการเคลื่อนที่สัมผัส ซึ่งก็จะไม่เป็นไปตามกฎข้อที่ 3

จากที่กล่าวมาจะเห็นได้ว่ากฎทั้ง 3 ข้อที่ตั้งขึ้นมานั้นเป็นเพียงแนวทางในการศึกษาความเสียดทานเท่านั้น ในทางปฏิบัติเราจะต้องนำไปปัจจัยอื่นๆ มาร่วมพิจารณาในการวิเคราะห์หาค่าความเสียดทานด้วย



รูปที่ 2.17 แสดงพื้นที่สัมผัสจริงของผิวสัมผัสทั่วไป

- กลไกพื้นฐานของการเกิดความเสียดทานแบบไถล

เป็นที่ทราบกันดีว่าพื้นผิวทางวิศวกรรม ไม่มีพื้นผิวใดที่เรียบจริง ถึงแม้จะมองเห็นว่าเรียบด้วยตาเปล่าแต่เมื่อมองผ่านกล้องที่มีกำลังขยายสูง จะพบว่ามีความลักษณะที่เป็นคลื่นขรุขระอยู่ แบบจำลองของความเสียดทานจึงขึ้นอยู่กับพื้นผิวที่สัมผัสกันจริง (Real area of contact) ดังแสดงในรูปที่ 2.17 Bowden และ Tabor สร้างสมมุติฐานว่า บริเวณที่สัมผัสกันของผิววัสดุจะเกิดความเค้นสูงที่จุดสัมผัสระหว่าง 2 ผิว เนื่องจากเป็นบริเวณเล็กๆจึงเกิดการเชื่อมติดกัน และจะถูกฉีกให้แยกออกจากกันเมื่อเกิดการเคลื่อนที่สัมพัทธ์

ภายหลังพบว่า ความเค้นสูงที่เกิดขึ้นที่ผิวสัมผัส ไม่ได้เกิดการเชื่อมยึดติดกัน แต่จะมีแรงยึดเหนี่ยวอยู่ค่าหนึ่ง ถ้าต้องการให้เกิดการเคลื่อนที่สัมพัทธ์ แรงที่ใช้จะต้องมากพอที่จะเอาชนะแรงยึดเหนี่ยวนี้ได้ นอกจากนี้เมื่อเกิดการเคลื่อนที่สัมพัทธ์ ส่วนที่เป็นยอดสูงของผิวที่แข็งกว่าของกลุ่มสัมผัสจะบุดลงบนผิวที่อ่อนกว่า เพื่อให้เกิดการเคลื่อนที่อย่างต่อเนื่องจึงต้องการแรงหรือพลังงานอีกส่วนหนึ่งในการเปลี่ยนรูปของผิวที่อ่อนกว่า ดังนั้น แรงเสียดทานจึงเท่ากับแรงที่ทำให้เกิดการเคลื่อนที่สัมพัทธ์ (F) จึงต้องเอาชนะแรงยึดเหนี่ยว (F<sub>a</sub>) และแรงในการเปลี่ยนรูปร่าง (F<sub>d</sub>)

$$F = F_a + F_d$$

- แรงยึดเหนี่ยว (Adhesive Force : F<sub>a</sub>)

พื้นผิวเล็กๆบริเวณที่สัมผัสกันจริงจะเกิดการยึดเหนี่ยวซึ่งอาจเกิดได้ทั้งจากปฏิกิริยาทางกายภาพหรือทางเคมี แรงยึดเหนี่ยวเกิดได้ง่ายบนพื้นผิวที่เรียบ สะอาด ปราศจากสิ่งสกปรก ในการที่จะทำให้เกิดการเคลื่อนที่สัมพัทธ์ ได้นั้นจะต้องมีแรงกระทำที่เพียงพอในการฉีกเพื่อทำลายแรงยึดเหนี่ยวนี้ บริเวณที่

มีความแข็งแรงน้อยที่สุดก็จะฉีกขาด ซึ่งอาจจะเป็นที่ผิวสัมผัส หรือเนื้อของวัสดุตัวใดตัวหนึ่งในกรณีที่แรงยึดเหนี่ยวระหว่างผิวสัมผัสแข็งแรงกว่าเนื้อในของวัสดุตัวนั้น

#### จากทฤษฎีของ Bowden และ Tabor

กรณีที่ไม่มีสารหล่อลื่นคั่นระหว่างผิว (Dry friction) จะพบว่า	กรณีที่มีสารหล่อลื่นคั่นระหว่างผิว (Partial liquid) จะพบว่า
$F_a = A_r + \tau_a$	$F_a = A_r [\alpha \tau_a + (1 - \alpha) \tau_l]$

- โดยที่  $A_r$  คือพื้นที่สัมผัสจริงของผิว  
 $\tau_a$  คือค่าความแข็งแรงของการยึดเหนี่ยวระหว่างผิว  
 $\alpha$  คือค่าอัตราส่วนระหว่างพื้นที่สัมผัสจริงต่อพื้นที่สัมผัสทั้งหมด  
 $\tau_l$  คือค่าความแข็งแรงเฉือนของของเหลวที่คั่นอยู่

ความแข็งแรงของการยึดเหนี่ยวขึ้นอยู่กับคุณสมบัติทางกล ทางกายภาพ และทางเคมีของพื้นผิว ทั้งคู่โดยทั่วไปความแข็งแรงของการยึดเหนี่ยวจะต่ำถ้ามีพื้นที่ที่สัมผัสจริงต่ำ เช่น ในกรณีที่มีฟิล์มบางกัน หรือมีการใช้สารหล่อลื่นเพื่อลดบริเวณการสัมผัสจริงของผิวคู่สัมผัส แต่ถ้าผิวสัมผัสกันในสูญญากาศ ไม่มีอนุภาคอื่นๆ มากั้นระหว่างกลาง จะทำให้ค่าความแข็งแรงของการยึดเหนี่ยวสูง นั่นหมายถึง ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานก็จะสูงด้วย

#### - แรงในการเปลี่ยนรูปร่าง (Deformation Force ; $F_d$ )

เนื่องจากบริเวณที่สัมผัสจริงของผิวคู่สัมผัสมักจะเป็นบริเวณเล็กๆ ของยอดสูง (Asperity) ขณะที่มีการเคลื่อนที่สัมผัสระหว่าง 2 ผิว จึงมักจะเกิดกลไกการเปลี่ยนรูปร่างอย่างถาวร (คือ การเปลี่ยนรูปแบบพลาสติก) ของผิวคู่สัมผัส ส่วนที่เป็นยอดสูงของผิวสัมผัสที่แข็งกว่าจะขูดไปบนผิวที่อ่อนกว่าทำให้เกิดการเปลี่ยนรูปร่างอย่างถาวร เกิดการแตกหัก หรือการฉีกขาดของวัสดุที่อ่อนนุ่มกว่า ดังนั้น เพื่อให้เกิดการเคลื่อนที่สัมผัสอย่างต่อเนื่อง แรงในการเคลื่อนที่ซึ่งจะต้องมากเพียงพอในการเปลี่ยนรูปของวัสดุที่อ่อนกว่านอกเหนือจากนั้นผิววัสดุบางส่วนที่ถูกขูดจนเกิดการแตกหัก เมื่อหลุดออกจากผิวชิ้นงานก็จะกลายเป็นอนุภาคขนาดเล็กที่มีความแข็งแรงสูงเนื่องจากกลไกการเปลี่ยนรูปร่างอย่างถาวรของวัสดุที่ทำให้วัสดุมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้นเนื่องจากความเครียด (Work hardening) อนุภาคขนาดเล็กเหล่านี้มีอิทธิพลในการเพิ่มแรงที่ต้องใช้ในการเคลื่อนที่เพราะจะสามารถขูดไปบนผิวชิ้นงานเหมือนกับส่วนที่เป็นยอดสูงของผิวแข็ง ถ้าหากต้องการลดแรงเสียดทานที่เกิดจากการเปลี่ยนรูปร่างวัสดุในส่วนนี้ เราสามารถทำได้โดยปรับสภาพผิวคู่สัมผัสให้มีความเรียบสูง ก็จะช่วยลดปริมาณของยอดสูงและลดการเปลี่ยนรูปของวัสดุให้น้อยลงได้ โดยเฉพาะอย่างยิ่ง ผิวที่มีความแข็งแรงสูงควรจะต้องทำให้เรียบมากยิ่งขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.11.2 การเสียดทานแบบกลิ้ง (Rolling Friction)

ในการเคลื่อนที่สัมผัสระหว่างสองพื้นผิว ลักษณะการเคลื่อนที่แบบกลิ้งจะเกิดได้ง่ายกว่า กล่าวคือ ระบบคู่สัมผัสต้องการพลังงานในการเคลื่อนที่ต่ำกว่าลักษณะการเคลื่อนที่แบบเลื่อนไถล แต่การเคลื่อนที่แบบกลิ้งมักจะเกิดขึ้นเฉพาะ ในกรณีที่วัตถุคู่สัมผัสหนึ่งมีลักษณะกลมหรือเกือบกลมเท่านั้น ในกลไกของการเคลื่อนที่แบบกลิ้งพลังงานในการเคลื่อนที่สัมผัสของระบบจะต้องสามารถเอาชนะแรงขีดเหนี่ยวและแรงในการเปลี่ยนรูปได้ ซึ่งก็จะเหมือนกับการเคลื่อนที่แบบไถล แต่มีความแตกต่างที่ทิศทางในการเข้าหา (Approach) และการเคลื่อนที่ (Separation) ของบริเวณสัมผัสซึ่งจะเกิดในทิศทางตั้งฉากกับผิว ไม่ได้เกิดในทิศทางขนานกับผิวเหมือนการไถล (ดูรูปที่ 2.15 ประกอบ) โดยปกติในขณะที่เกิดการกลิ้งก็จะมี การเคลื่อนที่รูปแบบอื่นอยู่ด้วย คือการไถลและการหมุน ถึงแม้ว่าการไถลหรือการหมุนจะเกิดขึ้นเพียงเล็กน้อยในการเคลื่อนที่แบบกลิ้ง แต่ก็เป็นตัวสร้างความต้านทานการเคลื่อนที่ส่วนใหญ่ของการเคลื่อนที่ทั้งหมด ตามสมการของค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานแบบกลิ้ง ( $\mu_R$ ) ดังต่อไปนี้

$$\mu_R = \frac{V_S}{V_R} \mu_k$$

โดยที่  $V_S$  เป็นค่าความเร็วของการไถล

$V_R$  เป็นความเร็วของการกลิ้ง

$\mu_k$  เป็นค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานจลน์ในสภาวะการเคลื่อนที่แบบไถล

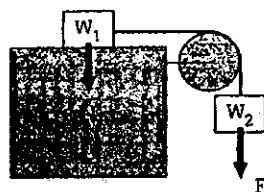
กฎของการเคลื่อนที่แบบกลิ้ง

1. แรงเสียดทานจะแปรผกผันกับค่ารัศมีความโค้งของผิวที่กลิ้ง
2. ผิวที่เรียบจะมีค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานต่ำกว่าผิวหยาบ
3. ความเสียดทานสถิต (Static friction) จะมีค่าสูงกว่าความเสียดทานจลน์ (Kinetic friction)

### 2.12 การวัดค่าความเสียดทาน

การวัดค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานเกี่ยวข้องกับการวัดแรง 2 ส่วน คือ  $F$  แรงที่ทำให้เริ่มหรือรักษาสภาวะการเคลื่อนที่สัมผัส และ  $N$  แรงตั้งฉากหรือแรงที่ทำให้ผิว 2 ผิวยึดติดกัน ดังแสดงในรูปที่

2.18

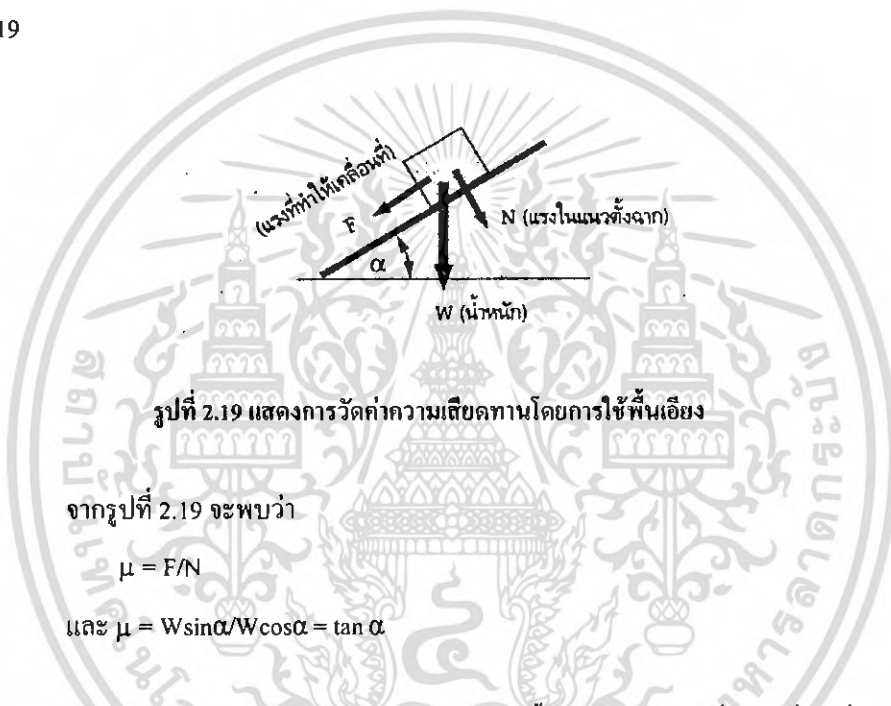


$$\mu = F/N = W_2/W_1$$

รูปที่ 2.18 แสดงการวัดค่าความเสียดทานโดยการดึงวัตถุผ่านรอก

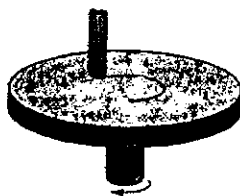
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การวัดค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานอย่างง่ายทำได้ตามรูปที่ 2.18 โดยใช้แรงจากตุ้มน้ำหนัก  $W_2$  ดึงตุ้มน้ำหนัก  $W_1$  ผ่านรอก เพิ่มแรง  $F$  จนกระทั่งตุ้มน้ำหนัก  $W_1$  เกิดการเคลื่อนที่ ค่าที่ได้จากการคำนวณจะเป็นค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานสถิต ( $\mu_s = F_s/N$ ) ถ้าต้องการวัดค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานจลน์ก็สามารถทำการทดสอบได้โดยใช้มือดึงที่เชือกแล้วปล่อย ถ้าตุ้มน้ำหนักหยุดการเคลื่อนที่ ก็เพิ่มแรง  $F$  ขึ้นแล้วลองดึงใหม่ จนกระทั่งถึงค่า  $F$  ที่ตุ้มน้ำหนักสามารถเคลื่อนที่อย่างต่อเนื่องหลังจากปล่อยมือจากการดึงแล้ว ( $\mu_k = F_k/N$ ) อีกวิธีหนึ่งที่เป็นารวัดค่าความเสียดทานอย่างง่าย คือการใช้พื้นเอียง ดังแสดงในรูปที่ 2.19



และการทดสอบจะทำโดยการเพิ่มมุมเอียงของพื้น ( $\alpha$ ) ไปจนกระทั่งวัตถุเริ่มเคลื่อน ไถลลงตามพื้นเอียงค่า  $\tan \alpha$  ที่คำนวณได้จะเป็นค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานสถิต ถ้าต้องการวัดค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานจลน์ ใช้มือผลักให้เกิดการเคลื่อนที่ก่อน แล้วคว่ำมุมที่เอียงไว้ตั้งแต่เริ่มต้นเพียงพอที่จะให้เกิดการเคลื่อนที่อย่างต่อเนื่องหรือไม่ ถ้าวัตถุหยุดเคลื่อนที่ ก็เพิ่มมุมเอียงของพื้นขึ้นแล้วลองผลักวัตถุอีกครั้งทำซ้ำไปจนกระทั่งถึงจุดที่วัตถุเกิดการเคลื่อนที่ต่อเนื่องได้ ก็จะสามารคคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานจลน์ได้

นอกจากวิธีการคำนวณจากการทดลองอย่างง่ายนี้แล้ว ก็ยังมีเครื่องมือเฉพาะสำหรับวัดค่าความเสียดทานอยู่อีกหลายชนิดตั้งแต่การใช้ Spring scale ไปจนถึงหัวรับสัญญาณทางไฟฟ้าในการวัดค่าแรงซึ่งโดยทั่วไปจะอาศัยหลักการวัดจากการเปลี่ยนแปลงของวัตถุในช่วงการเปลี่ยนรูปอย่างไม่ถาวรเมื่อมีแรงมากระทำที่วัตถุนั้น โดยใช้อุปกรณ์ต่างๆ เช่น Strain gauge, Piezoelectric หรือ Acoustic emission เครื่องมือวัดความเสียดทานแต่ละอย่างจะแตกต่างกันที่ลักษณะการเคลื่อนที่สัมพัทธ์ และอุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดแรง



รูปที่ 2.20 หลักการทำงานของ Pin-on-Disk

ตัวอย่างเครื่องมือวัดความเสียดทานที่ใช้กันค่อนข้างแพร่หลายคือ Pin-on-disk ในอุปกรณ์ชุดนี้ ชิ้นส่วนที่เป็นหมุด (Pin) ซึ่งเป็นวัสดุที่นำมาทดสอบ จะยึดไว้โดยแกนที่ติดตั้งอุปกรณ์วัดแรง และจะเคลื่อนที่สัมผัสบนจาน (Disk) งานทดสอบนี้จะหมุนโดยมอเตอร์ดังแสดงในรูปที่ 2.20 เครื่องทดสอบแบบ Pin-on-disk เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ง่าย และสามารถให้ผลของความเสียดทานที่รวดเร็วได้ จึงเป็นหนึ่งในเครื่องมือทดสอบที่ได้รับความนิยมอย่างกว้างขวาง

### 2.13 ทฤษฎีคุณสมบัติและการประยุกต์ใช้งานพลาสติก

#### 2.13.1 การผลิตพลาสติกในประเทศไทย

อุตสาหกรรมการผลิตพลาสติกในประเทศไทย เริ่มจากการนำเข้ามาผลิตภัณฑ์พลาสติกสำเร็จรูป เช่น เครื่องใช้ภายในบ้าน พลาสติกที่ใช้ในอุปกรณ์ไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ และของเล่นเด็ก เป็นต้น ประมาณปี พ.ศ. 2512 ได้มีการสั่งนำเข้าเครื่องจักรแปรรูปและเม็ดพลาสติก เพื่อทำการแปรรูปพลาสติกใช้ในประเทศ เนื่องจากปริมาณการใช้งานพลาสติกในประเทศเพิ่มขึ้นและมีอัตราการขยายตัวเพิ่มมากขึ้นทุกปี จึงทำให้อัตราการเติบโตและมูลค่าของผลิตภัณฑ์จากอุตสาหกรรมเพิ่มมากขึ้นเรื่อยๆ

อุตสาหกรรมการผลิตเม็ดพลาสติกในประเทศไทย เริ่มจากการตั้งโรงงานผลิตพอลิไวนิลคลอไรด์ (PVC) ของบริษัท ไทยพลาสติกและเคมีภัณฑ์ จำกัด ในปี พ.ศ. 2514 ซึ่งโรงงานสั่งนำเข้าวัตถุดิบหลักคือ ไวนิลคลอไรด์โมโนเมอร์ (Vinyl Chloride Monomer, VCM) เพื่อผลิต PVC ต่อมาได้มีการขยายตัวของผลิตภัณฑ์พลาสติกสูงมาก ดังนั้น ในปี พ.ศ. 2526 รัฐบาลจึงได้มีแผนในการจัดตั้งโรงงานปิโตรเคมี เพื่อทำหน้าที่เป็นผู้รับผิดชอบในการผลิตวัตถุดิบ ให้กับโรงงานผลิตเม็ดพลาสติกซึ่งแบ่งโครงการออกเป็น 2 ระยะ โครงการระยะแรก (NPC-I, The National Petrochemical Complex Phase I) และโครงการระยะที่ 2 (NPC-II)

โครงการปิโตรเคมีระยะที่ 1 เริ่มดำเนินการในปี พ.ศ. 2532 โดยมีบริษัทปิโตรเคมีแห่งชาติ จำกัด (National Petrochemical Corporation Limited, NPC) เป็นผู้ดำเนินการ โดยมีโรงงานตั้งอยู่ที่ นิคมอุตสาหกรรมมาบตาพุด จ.ระยอง มีหน้าที่หลักในการผลิต โมโนเมอร์ เอทิลีน และ โพรไพลีน จากก๊าซธรรมชาติ ที่แยกแล้วและส่งมาจากโรงแยกก๊าซของการปิโตรเลียมแห่งประเทศไทย (ปตท.) ซึ่งตั้งอยู่ในนิคมเดียวกัน วัตถุดิบในรูปก๊าซเอทีน โพรเพน และ แอลพีจี จะถูกเปลี่ยนให้เป็นโอลิฟินด์ แล้วนำไปผลิตพอลิเอทิลีน (PE) พอลิโพรไพลีน (PP) และพอลิไวนิลคลอไรด์ (PVC) ดังนั้นภายใต้โครงการปิโตรเคมีระยะที่ 1 มี บริษัท ปิโตรเคมีแห่งชาติ จำกัด เป็นผู้ผลิตขั้นต้น (upstream) และมีบริษัทเอกชนอีกหลาย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บริษัทที่เข้าร่วมผลิตเม็ดพลาสติก โดยรับวัตถุดิบจาก บริษัท ปิโตรเคมีแห่งชาติ จำกัด เรียกบริษัทเหล่านี้ว่า เป็นผู้ผลิตขั้นปลาย (downstream) รายละเอียดการผลิต โครงการปิโตรเคมีระยะที่ 1 แสดงดังตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 บริษัทผู้ผลิตปิโตรเคมีและเม็ดพลาสติกภายใต้โครงการ NPC-I

1. โรงงานอุตสาหกรรมปิโตรเคมีขั้นต้น (Upstream Petrochemical Industry)		
1.1 บริษัท ปิโตรเคมีแห่งชาติ จำกัด	ชนิดผลิตภัณฑ์ ปริมาณการผลิต (ตัน/ปี)	
	PE	401,000
	PP	126,000
2. โรงงานอุตสาหกรรมปิโตรเคมีขั้นปลาย (Downstream Petrochemical Industry)		
	ชนิดผลิตภัณฑ์ ปริมาณการผลิต (ตัน/ปี)	
2.1 บริษัท เอชเอ็มซี พอลิเมอร์ จำกัด (HMC Polymer Co.,Ltd, HMC)	PP	140,000
2.2 บริษัท ไทยพลาสติกและเคมีภัณฑ์ จำกัด (Thai Plastic and Chemicals Co.,Ltd , TPC)	VCM	40,000
	PVC	280,000
2.3 บริษัท อุตสาหกรรมปิโตรเคมีคัลไทย จำกัด (Thai Petrochemical Industry Co.,Ltd , TPI)	PE	300,000
2.4 บริษัท ไทยพอลิเอทิลีน จำกัด (Thai Polyethylene Co.,Ltd , TPE)	PE	270,000

โครงการปิโตรเคมีระยะที่ 2 (NPC-II) เริ่มเปิดดำเนินการในปี พ.ศ. 2536 โดยมีจุดประสงค์ เพื่อเพิ่มปริมาณการผลิตวัตถุดิบสำหรับพอลิเมอร์และอุตสาหกรรมต่อเนื่องอื่นๆ ได้มีการก่อตั้งโรงงานที่ผลิต โอลิฟินด์ ทำนองเดียวกับ NPC-I เพื่อเพิ่มปริมาณวัตถุดิบกับ โรงงานที่ผลิต PE, PP และ PVC เดิม และเพิ่มโรงงานผลิตอโรมาติกส์ (BTX) เพื่อขยายขอบเขตการผลิตวัตถุดิบสำหรับการผลิตพอลิเมอร์ภายในประเทศให้กว้างขวางมากยิ่งขึ้น จึงได้มีบริษัท 2 บริษัท คือ บริษัท ไทยโอลิฟินด์ จำกัด (Thai Olefins Limited ,TOC) เป็นผู้ดำเนินการ โรงงานผลิตโอลิฟินด์ และ บริษัท ไทยอโรมาติกส์ จำกัด (Thai Aromatic Limited , TAC) เป็นผู้ดำเนินการ โรงงานผลิตอโรมาติกส์ โรงงานทั้ง 2 แห่ง ตั้งอยู่ที่นิคมอุตสาหกรรมมาบตาพุด จ.ระยอง รายละเอียดของโครงการปิโตรเคมีแห่งชาติ ระยะที่ 2 แสดงในตารางที่ 2.4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.4 แสดงบริษัทผู้ผลิตปิโตรเคมีและเม็ดพลาสติกภายใต้โครงการ NPC-II

1. โรงงานอุตสาหกรรมปิโตรเคมีขั้นต้น (Upstream Petrochemical Industry)		
	ชนิดผลิตภัณฑ์ปริมาณการผลิต (ตัน/ปี)	
1.1 บริษัท ไทยโอลิฟินส์ จำกัด (Thai Olefin Co.,Ltd)	Ethylene	350,000
	Propylene	190,000
	Mixed C4	100,000
1.2 บริษัท ไทยอโรมาติกส์ จำกัด (Aromatic (Thailand) Co.,Ltd)	p-Xylene	322,000
	Benzene	200,000
	Toluene	52,000
	o-Xylene	29,000
	Mixed Xylene	15,000
2. โรงงานอุตสาหกรรมปิโตรเคมีขั้นกลาง (Intermediate Petrochemical Industry)		
	ชนิดผลิตภัณฑ์ปริมาณการผลิต (ตัน/ปี)	
2.1 Vinyl Thai	VCM	140,000
2.2 Siam Styrene Monomer	Styrene monomer	200,000
2.3 Tuntex Purified Terephthalic acid	PTA	400,000
2.4 Eternal Petrochemical Phthalic	PA	30,000
3. โรงงานอุตสาหกรรมปิโตรเคมีขั้นปลาย (Downstream Petrochemical Industry)		
	ชนิดผลิตภัณฑ์ปริมาณการผลิต (ตัน/ปี)	
3.1 Bangkok Polyethylene	Polyethylene	270,000
3.2 Vinylthai	PVC	150,000
3.3 Thai Polypropylene	PP	100,000
3.4 Thai Petrochemical Industry	PP	220,000
3.5 Bangkok Synthesis	Methyl T-Butyl Ether	55,000
	(MTBE)	
3.6 Thai Petrochemical Industry	PS	58,000

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.7 Pacific Plastic/Eternal/Sri Thep Thai	PS	54,000
3.8 Thai Petrochemical Industry	ABS	20,000
3.9 Eternal Resin/Monsanto Premier Kasai	ABS	10,000
3.10 Teijin/Thai Melon/Toray/Oreintal Fiber/Tuntex/Siam Polyester/Sunflag	polyester	360,000

จากตารางที่ 2.3 และตารางที่ 2.4 จะเห็นได้ว่าโครงสร้างของอุตสาหกรรมการผลิตพอลิเมอร์หรืออุตสาหกรรมปิโตรเคมีในประเทศไทย สามารถแบ่งออกเป็น 3 ระดับ คือ

1. อุตสาหกรรมปิโตรเคมีขั้นต้น (Upstream Petrochemical Industry) เป็นอุตสาหกรรมที่ใช้ผลิตภัณฑ์จากการแยกก๊าซธรรมชาติ และการกลั่นน้ำมัน เพื่อผลิตวัตถุดิบสำหรับอุตสาหกรรมขั้นกลาง และขั้นปลาย ซึ่งในปัจจุบันอุตสาหกรรมในประเทศไทย ประกอบด้วยอุตสาหกรรมสองส่วน คือ การผลิตโอลิฟินด์ และอโรเมติกส์

2. อุตสาหกรรมปิโตรเคมีขั้นกลาง (Intermediate Petrochemical Industry) เป็นอุตสาหกรรมที่ใช้ผลิตภัณฑ์จากอุตสาหกรรมขั้นต้น เพื่อผลิตวัตถุดิบ ซึ่งมักจะเป็น โมโนเมอร์ สำหรับการผลิตพอลิเมอร์ในโรงงานขั้นปลาย ผลิตภัณฑ์หลักของอุตสาหกรรมปิโตรเคมีขั้นกลางของประเทศไทย คือ สไตรีน (Styrene Monomer , SM) เอทิลีนออกไซด์ (Ethylene Oxide , EO) เอทิลีนไกลคอล (Ethylene Glycol ,EG) ไวนิลคลอไรด์โมโนเมอร์ (Vinyl Chloride Monomer ,VCM) พะทาลิกแอนไฮไดรด์ (Phthalic Anhydride ,PA) และ กรดเทอเรพทาลิกบริสุทธิ์ (Purified Terephthalic Acid ,PTA) เป็นต้น

3. อุตสาหกรรมปิโตรเคมีขั้นปลาย (Downstream petrochemical industry) เป็นอุตสาหกรรมที่ใช้วัตถุดิบอุตสาหกรรมขั้นกลางหรือขั้นต้น ผลิตพอลิเมอร์ ในประเทศไทยพอลิเมอร์ที่ผลิต ได้แก่ LDPE, LLDPE, HDPE, PS, PP, PVC, ABS, PET และพอลิเอสเตอร์ เป็นต้น

เพื่อให้เข้าใจถึงธรรมชาติ คุณสมบัติ และการใช้งานพลาสติกชนิดต่างๆ ในบทนี้จะอธิบายคุณสมบัติทั่วไปของพอลิเมอร์ในกลุ่มนี้ รวมทั้งตัวอย่างการประยุกต์ใช้งานในลักษณะต่างๆ เพื่อความสะดวกในการศึกษา จะแบ่งพลาสติก ออกเป็น 3 กลุ่ม คือพลาสติกที่มีการใช้งานปริมาณสูง (Commodity Thermoplastics) พลาสติกวิศวกรรม (Engineering Thermoplastics) และพลาสติกสมรรถนะสูง (High Performance Thermoplastics)

พลาสติกที่ใช้งานในปริมาณสูง (Commodity Thermoplastics) พลาสติกในกลุ่มนี้ มีการผลิตใช้งาน ประมาณ 80-85% ของพลาสติกที่ผลิตทั้งหมด ตัวอย่างเช่น โพลีเอทิลีน (PE และ PP) พอลิเมอร์ในกลุ่มสไตรีน (ได้แก่ PS และ HIPS) และพีวีซี (PVC) อุตสาหกรรมพลาสติกในประเทศไทย

ส่วนใหญ่ยังอยู่ในขั้นการพัฒนาและผลิตพลาสติกในกลุ่มนี้ ในประเทศสหรัฐอเมริกา และประเทศไทย ในปี พ.ศ. 2536 แสดงในตารางที่ 2.5 และ 2.6 ตามลำดับ

ตารางที่ 2.5 ปริมาณการผลิตเทอร์โมพลาสติกพลาสติกบางชนิดในประเทศสหรัฐอเมริกา  
ในปี พ.ศ. 2536

ชนิดพลาสติก	ปริมาณการผลิต (พันล้านปอนด์)	มูลค่า(%)เมื่อเทียบกับมูลค่า ของ เทอร์โมพลาสติกทั้งหมด
LDPE	12.0	26.0
PVC และ โคลอพลิเมอร์	10.3	22.3
HDPE	9.9	21.4
PP	8.6	18.6
PS	5.4	11.7

ตารางที่ 2.6 ปริมาณการผลิตเทอร์โมพลาสติกบางชนิดในประเทศไทย  
ในปี พ.ศ.2536

ชนิดพลาสติก	ปริมาณการผลิต (พันตัน)
HDPE/LDPE	864
PVC	692
PP	599
PS	254
ABS/SAN	113

### 2.13.2 พอลิโอเลฟินส์ (Polyolefins)

พอลิโอฟินส์ หมายถึง พอลิโอทีลีน (ชนิดและเกรดต่างๆ ซึ่งมีระดับความเป็นผลึกและความหนาแน่น แตกต่างกัน) และ พอลิโพรไพลีน เพื่อความสะดวกในการอธิบายจึงขอแบ่งพอลิโอเลฟินส์ ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.13.3 พอลิเอทิลีน (Polyethylene)

พอลิเมอร์ที่รู้จักกันมากที่สุด มีโครงสร้างพื้นฐานง่ายที่สุด มีการถ่วงดัดบ่งบ่งที่สุดและมีปริมาณการใช้งานสูงที่สุดในบรรดาเทอร์โมพลาสติกทั้งหมด การผลิตพอลิเอทิลีน ทำได้โดยใช้เทคนิคการพอลิเมอไรซ์หลายเทคนิค ได้ผลิตภัณฑ์หลายรูปแบบตั้งแต่น้ำหนักโมเลกุลต่ำ ซึ่งมีลักษณะเป็นไข จนมีน้ำหนักโมเลกุล และระดับการเป็นผลึกสูง พอลิเอทิลีนมีหลายชนิดซึ่งยกตัวอย่าง 2 ชนิดคือพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ (Low Density Polyethylene, LDPE) และพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง (High Density Polyethylene, HDPE)

### 2.13.4 พอลิโพรไพลีน (Polypropylene, PP)

พอลิโพรไพลีนเป็นวัสดุที่ทนต่อการแปรรูปด้วยความร้อน ทนต่อแรงดึง แรงกระแทกและทรงตัวดี ผิวไม่มีแนวโน้มของการสึกหรอ ฆ่าเชื้อโรคที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส ไม่ดูดซึมน้ำ จะเปราะที่อุณหภูมิต่ำกว่า 0 องศาเซลเซียส สัมประสิทธิ์การนำความร้อน ( $\lambda$ ) 1.09 kJ/mh $\cdot$ c ค่าความร้อนจำเพาะ ( $c$ ) 1.93 kJ/kg $\cdot$ c ความหนาแน่น ( $\rho$ ) ที่อุณหภูมิ 20 $^{\circ}$ C เท่ากับ 0.91 g/cm $^3$  ระยะเวลาอบแห้ง (ก่อนนำเข้าเครื่องฉีด) 1-1.5 ชั่วโมงที่อุณหภูมิ 75 $^{\circ}$ C อัตราการหดตัวอยู่ระหว่าง 2-3% เป็นแบบไหลเทยาก

ตารางที่ 2.7 เปรียบเทียบคุณสมบัติ LDPE, HDPE และ PP

สมบัติ	LDPE	HDPE	PP
ความหนาแน่น (g/cm $^3$ )	0.91-0.93	0.94-0.97	0.90-0.91
ปริมาณผลึก (%)	50-70	80-95	82
อุณหภูมิหลอม (c $^{\circ}$ )	98-120	127-135	165-171
การทนต่อแรงดึง (MPa)	4.1-16	21-38	31-41
โมดูลัสคึง (GPa)	0.1-0.26	0.41-1.24	1.10-1.55
การยืดที่จุดขาด (%)	90-800	20-130	100-600
การทนต่อแรงกระแทก (J/m)	ไม่แตก	27-1068	21-35

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.8 การแบ่งกลุ่มพลาสติกตามความหนาแน่น

ความหนาแน่น g/cm <sup>3</sup>	ชนิดของพลาสติก
0.9-1.0	PE,PP,PB,PIB
1.0-1.2	PS,ASN,SB,ABS,ABA,PMMA,PPO,CP,CAB,PC,PA
1.2-1.5	PVC,POM,CA,PETB,PBTB,PSU,PUR
1.5-1.8	Thermosetting ผสมสารอินทรีย์
1.8-2.2	PTFE

ตารางที่ 2.9 สารละลายและไม่ละลาย สำหรับเทอร์โมพลาสติกบางตัว

ชนิดของพลาสติก	ละลายใน	ไม่ละลายใน
PE,PP	p-Xylene, dekaping,trichlorbenzene	Acetone,low-alcohol
PS	เบนซีน,toluene,chloroform,cyclohexane, Methylenechloride,acetone	Low-alcohol
PVC	Tetrahydrofurane,cyclohexane,dimethyl- Formamide	Methanol,acetone, heptane
PMMA	Chloroform,acetone,ethylacetate,toluene	methanol
PA	กรดมค,m-cresol,กรดกำมะถันเข้มข้น	methanol
POM	Benzylalcohol,dimethylformamidde,butyolcetate	Methanol,dithylether

#### 2.14 ความสำคัญของการวัดทางกล

ข้อมูลของปริมาณภายใต้สภาวะจริงของตัวแปรทางกายภาพ และกระบวนการจะได้รับการวัด ถ้าไม่เช่นนั้นแล้วปริมาณเหล่านั้นจะได้รับการประมาณเท่านั้น การวัดเป็นหลักการพื้นฐานสำหรับงานวิจัย การออกแบบ และการพัฒนาทั้งหมด การวัดยังเป็นส่วนประกอบหลักในกระบวนการควบคุมการทำงานในปัจจุบันยังต้องการการวัดสำหรับการตรวจสอบสมรรถนะที่ถูกต้อง เช่น โรงงานไฟฟ้าสมัยใหม่ ความเที่ยงตรงในระบบการผลิตทั้งหลายโดยเฉพาะเครื่องซีเอ็นซี อุปกรณ์ไมโครอิเล็กทรอนิกส์ ปริมาณที่วัด เช่น อุณหภูมิ ความดัน อัตราการไหล และ แอมพลิจูดของการสั่น ต้องคอยเฝ้าดูให้คงที่เพื่อความมั่นใจในสมรรถนะที่ถูกต้องของระบบ

การใช้เครื่องมือวัดในกระบวนการอุตสาหกรรม เครื่องจักรที่ทำงานอัตโนมัติ การควบคุมแบบต่าง ๆ และอุปกรณ์เกี่ยวกับความปลอดภัยทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงแนวคิดในการวัด นอกจากนั้นระบบ

เครื่องมือวัดยังทำหน้าที่ขยายการรับรู้ของมนุษย์ การวัดมีความสำคัญยิ่งต่อระบบการค้า เพราะราคาของสินค้า ตั้งอยู่บนพื้นฐานของจำนวนวัสดุ ค่าพลังงาน ค่าใช้จ่ายของเวลาและแรงงาน เงื่อนไขบังคับอื่น ๆ การวัดที่ถูกต้อง ตรง และรวดเร็ว จะช่วยให้สามารถลดค่าใช้จ่าย ดังกล่าวได้

## 2.15 วิธีการเบื้องต้นของการวัด

การวัดมีวิธีการพื้นฐาน 2 วิธี คือ

1. การเปรียบเทียบโดยตรง (Direct comparison) เป็นการเปรียบเทียบค่าที่วัดกับค่ามาตรฐานปฐมภูมิหรือ ค่ามาตรฐานทุติยภูมิ เช่น การใช้ตลับเมตรวัดความยาวของโต๊ะ ตลับเมตรถือเป็นค่ามาตรฐานทุติยภูมิ เพราะตลับเมตรที่ใช้อยู่ไม่ใช่ตลับเมตรอันแรกที่ใช้เปรียบเทียบความยาวกับความยาวคลื่นแสง

2. การเปรียบเทียบโดยอ้อม (Indirect comparison) การวัดแบบนี้จะใช้วัดปริมาณที่เกินความสามารถของประสาทสัมผัสของมนุษย์ที่จะรับรู้ได้ เป็นการเปรียบเทียบที่ผ่านระบบการปรับเทียบ (Calibration system) วิธีการนี้ใช้อุปกรณ์รับรู้ส่งผ่านสัญญาณที่เชื่อมต่อกันเป็นระบบการวัด อุปกรณ์เหล่านี้จะทำหน้าที่แปลงปริมาณพื้นฐานที่วัดเป็นสัญญาณอนาล็อก จากนั้นก็แสดงออกมาในรูปของการกระจัดของตัวชี้หรือตัวเลข การประมวลผลสัญญาณที่วัดได้อาจทำได้หลายรูปแบบ ในปัจจุบันอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ช่วยให้ระบบการวัดทำได้สะดวกและง่ายขึ้น

ระบบเครื่องมือวัดทางอิเล็กทรอนิกส์เป็นระบบที่ได้รับการพัฒนาอย่างต่อเนื่อง ทั้งนี้เนื่องจากในปัจจุบันเทคโนโลยีสารกึ่งตัวนำได้มีความก้าวหน้าอย่างมาก และได้นำมาพัฒนาเป็น ตัวรับรู้ (Sensor) และทรานสดิวเซอร์ (Transducer) ระบบเครื่องมือวัดทางอิเล็กทรอนิกส์สามารถนำไปใช้วัดปริมาณทางกล และปริมาณทางความร้อนได้อย่างถูกต้อง

ตัวอย่างปริมาณทางกล ได้แก่

- |                          |               |                      |
|--------------------------|---------------|----------------------|
| - แรง                    | - ความเครียด  | - ความดัน            |
| - โมเมนต์ หรือทอร์ก      | - การกระจัด   | - ความเร็ว           |
| - ความเร่ง               | - ความเร็วไหล | - อัตราการไหลเชิงมวล |
| - อัตราการไหลเชิงปริมาตร | - ความถี่     | - เวลา               |

ตัวอย่างปริมาณทางความร้อน ได้แก่

- |            |             |
|------------|-------------|
| - อุณหภูมิ | - Heat flux |
|------------|-------------|

## 2.16 การวิเคราะห์เชิงวิศวกรรม

การวิเคราะห์เชิงวิศวกรรมถูกนำมาใช้ในการประเมินผลส่วนประกอบเครื่องจักรกล โครงสร้าง หรือยานพาหนะที่ออกแบบใหม่ หรือปรับปรุงแก้ไข เพื่อประเมินประสิทธิภาพและสมรรถนะของสิ่งนั้น ๆ การดำเนินการวิเคราะห์ทางวิศวกรรมมี 2 วิธีคือ

1. การวิเคราะห์ทางทฤษฎี (Theoretical approach) การวิเคราะห์แบบจำลองของส่วนประกอบ ถูกกำหนดเป็นสูตรและสมมติฐานถูกกำหนดให้เหมาะสมกับเงื่อนไขการทำงาน เขียนสมการอธิบาย พฤติกรรมของแบบจำลอง จากนั้นแก้สมการโดยวิธีการทางคณิตศาสตร์ที่ถูกต้อง หรือการคำนวณทางตัวเลข ผลที่ได้จากการวิเคราะห์ทางทฤษฎีนี้ จะแสดงให้เห็นให้ผู้ออกแบบได้เห็นอย่างเพียงพอในเรื่องของแบบ และการประเมินสมรรถนะที่เป็นไปได้ของส่วนประกอบ หรือโครงสร้างในการใช้งาน

ความไม่แน่นอนมักจะเกิดบ่อยครั้งกับความถูกต้องของแบบจำลองวิเคราะห์ (Analytical model) หรือวิธีการทางตัวเลขอันเนื่องมาจากสมมติฐาน และการปิดเศษ

2. การวิเคราะห์โดยวิธีการทดลอง (Experimental approach) ต้นแบบของส่วนต่าง ๆ จะถูกสร้างขึ้นเพื่อนำมาทดสอบและประเมินสมรรถนะ โดยการวัดค่าปริมาณที่สำคัญ โดยตรงจากต้นแบบ ซึ่งเป็นปริมาณที่ควบคุมความเพียงพอของการออกแบบ

การวิเคราะห์โดยวิธีการทดลองนี้จะเสียค่าใช้จ่ายสูงกว่าการวิเคราะห์โดยวิธีทางทฤษฎี ความผิดพลาดจากการทดลองอาจเพิ่มขึ้นอย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้ในการวัด ซึ่งมักจะมีคำถามเสมอว่า ในการวัดนั้นทรานสดิวเซอร์ติดตั้งในตำแหน่งที่ถูกต้องหรือไม่ เพราะปริมาณที่แสดงออกมานั้นมีผลต่อการพัฒนา รูปแบบ

ในงานวิศวกรรมบางปัญหาอาจใช้ทฤษฎีเพียงอย่างเดียว หรือใช้การทดลองเพียงอย่างเดียวก็เพียงพอ แต่ปัญหาส่วนใหญ่ต้องการการผสมผสานที่เหมาะสมของการใช้วิธีการแก้ปัญหาทั้งสอง

การรวมวิธีทางทฤษฎีและวิธีการทดลองเข้าด้วยกันจึงเป็นวิธีการวิเคราะห์ทางวิศวกรรมที่จัดว่า คุ่มค่าที่สุด ที่แน่ใจถึงประสิทธิภาพและสมรรถนะที่เชื่อถือได้ของเครื่องจักรกล โครงสร้าง หรือระบบ อิเล็กทรอนิกส์ ที่ออกแบบใหม่ หรือปรับปรุงใหม่

ตารางที่ 2.10 ลักษณะเด่นของวิธีการแก้ปัญหาแต่ละแบบ

วิธีการทางทฤษฎี	วิธีการทดลอง
<ul style="list-style-type: none"> <li>• เป็นการศึกษาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของโลกของความเป็นจริงซึ่งต้องการสมมุติฐานที่ชัดเจนเสมอ</li> <li>• ให้ผลเฉลยในรูปทั่ว ๆ ไปสำหรับปัญหาประเภทเดียวกัน</li> <li>• การลดสมมุติฐานนำไปสู่แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ซับซ้อนยุ่งยากขึ้น</li> <li>• ความต้องการสิ่งอำนวยความสะดวกในการเริ่มต้นศึกษามีเพียงเล็กน้อย อาจใช้แค่ดินสอกับกระดาษ</li> <li>• การศึกษาสามารถเริ่มต้นได้ทันที</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• เป็นการศึกษาในโลกของความจริง ไม่ต้องการสมมุติฐาน</li> <li>• ให้ผลเฉลยเฉพาะเครื่องมือที่ใช้ศึกษา</li> <li>• เมื่อต้องการการวัดที่ถูกต้องมากขึ้น เครื่องมือที่ใช้วัดจะมีความซับซ้อนมากขึ้น</li> <li>• ต้องการสิ่งอำนวยความสะดวกในห้องทดลองมาก (เสียค่าใช้จ่ายมาก)</li> <li>• การสูญเสียเวลาอาจเกิดขึ้นในการสร้างเครื่องมือและการแก้ไข</li> </ul>

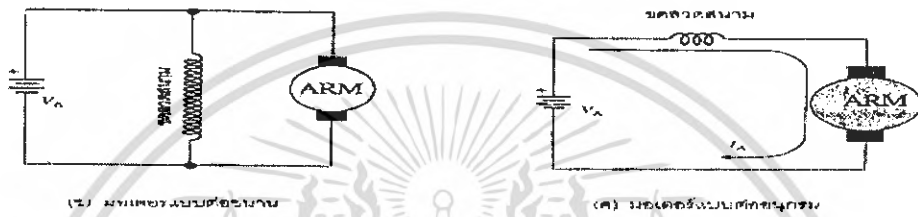
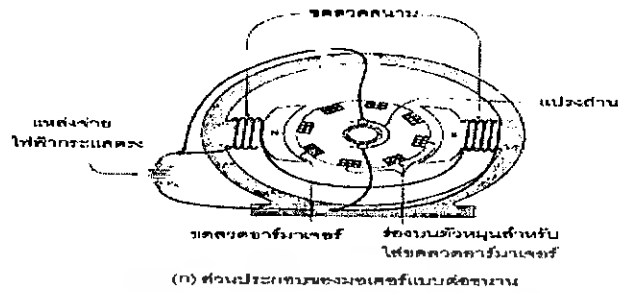
### 2.17 มอเตอร์กระแสตรง

มอเตอร์กระแสตรงคือเครื่องจักรกลที่ทำหน้าที่เปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานกลโดยอาศัยหลักการคือ เมื่อกระแสไฟฟ้าไหลผ่านลวดตัวนำซึ่งอยู่ในสนามแม่เหล็กจะมีแรงเกิดขึ้นบนลวดตัวนำ ทำให้ลวดตัวนำเคลื่อนที่

มอเตอร์กระแสตรง แบ่งออกตามการต่อขดลวดสนาม (Field-coil) ได้เป็น

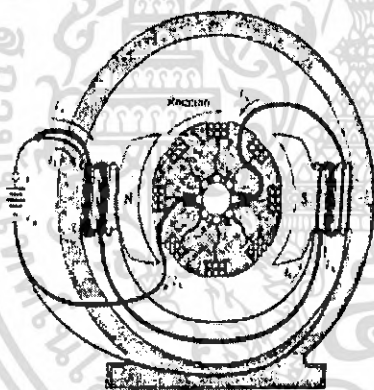
- มอเตอร์แบบต่อขนาน (รูปที่ ข)
- มอเตอร์แบบต่ออนุกรม (รูปที่ ค)
- มอเตอร์แบบผสม (ขดลวดสนามของแบบขนานและแบบอนุกรมต่อเข้าด้วยกันเพื่อให้ emf. ของแต่ละส่วนรวมกัน) (รูปที่ ง)

ในระบบควบคุมมอเตอร์กระแสตรง ใช้จักรวาล์วเพื่อควบคุมการไหล หมุนขับเคลื่อน ปรับตัวหนึ่ง ฯลฯ

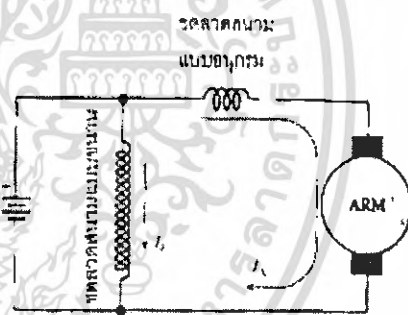


(ข) มอเตอร์แบบขดลวดสนาม

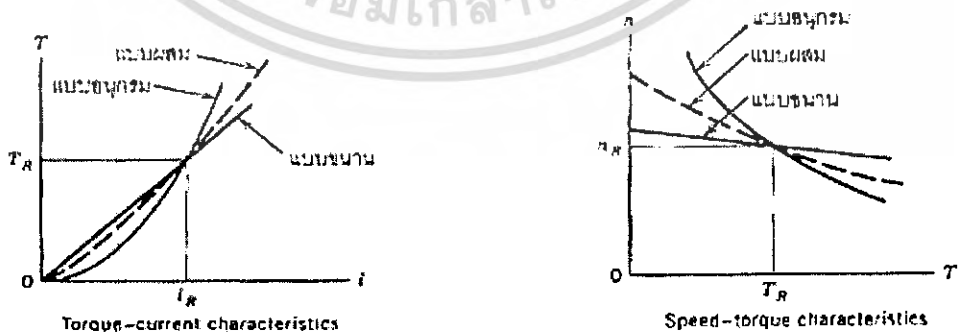
(ค) มอเตอร์แบบขดลวดอาร์มาเจอร์



(ง) มอเตอร์แบบผสม



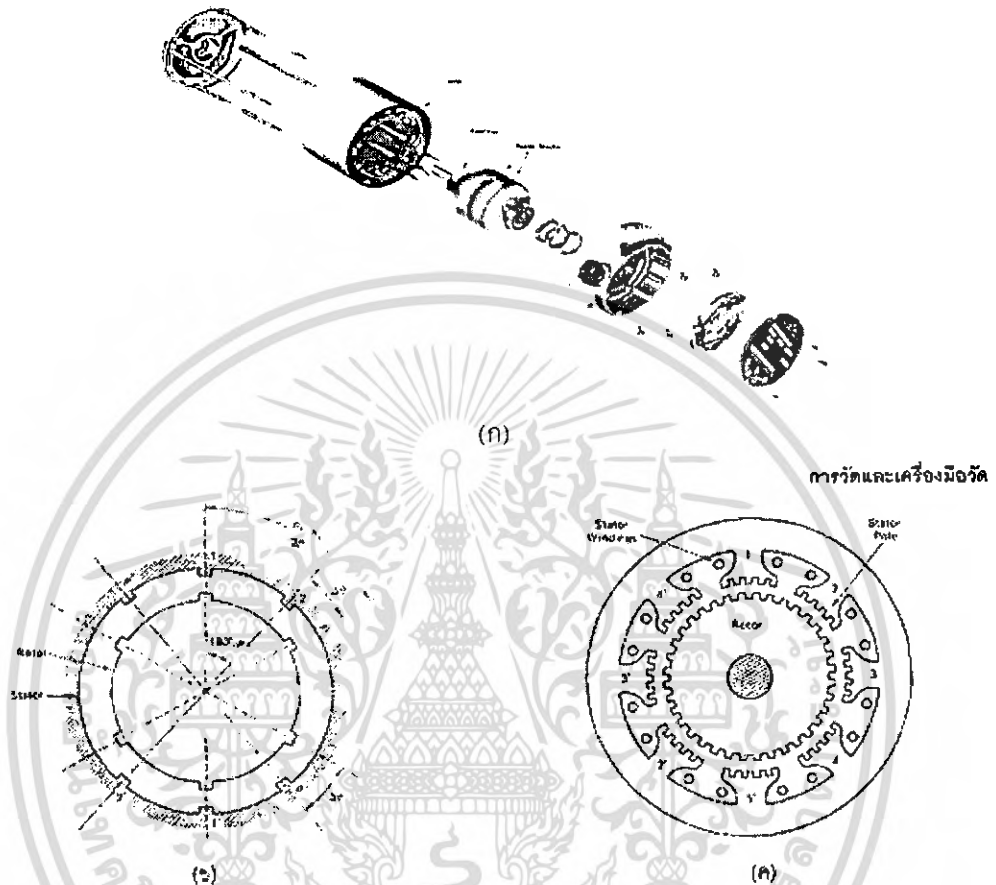
รูปที่ 2.21 แผนภูมิการพันมอเตอร์และคุณลักษณะอัตราเร็ว - ทอร์กของมอเตอร์กระแสตรง



รูปที่ 2.22 คุณลักษณะการทำงานของมอเตอร์กระแสตรง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.17.1 สเต็ปป์มอเตอร์



รูปที่ 2.23 รายละเอียดโครงสร้างของสเต็ปป์มอเตอร์

สเต็ปป์มอเตอร์ต่างจากมอเตอร์กระแสตรงหลายอย่างดังแสดงในรูป ส่วนที่อยู่กับที่ (Stator) ประกอบด้วย ขั้วสนาม (Field poles) เล็ก ๆ จำนวนมาก กระจายอยู่รอบเส้นรอบวง นอกจากนั้นแต่ละขั้วยังประกอบด้วย ฟันเล็ก ๆ จำนวนมาก (รูปมี 5 ฟัน) อาร์มาเจอร์ทำจากแม่เหล็กถาวรเป็นฟัน 1 หรือ 2 แถว แต่ละฟันมีระยะห่างเท่ากันรอบเส้นรอบรูปดังแสดงในรูปที่ (ค)

การทำงานของสเต็ปป์มอเตอร์ต่างจากมอเตอร์ทั่ว ๆ ไปคือ เมื่อป้อนแรงดันไฟฟ้าให้ สเต็ปป์มอเตอร์ อาร์มาเจอร์จะหมุนเพียงเล็กน้อยและหยุด ต่างจากมอเตอร์ทั่ว ๆ ไป ซึ่งจะหมุนทันทีและตลอดเวลาเท่าที่ยังมีแรงดันป้อนอยู่ ความแม่นยำของสเต็ปป์มอเตอร์ดีเยี่ยมถ้าทอร์คที่เกิดขึ้นไม่เกินขีดความสามารถของมอเตอร์ พบมากในคอมพิวเตอร์

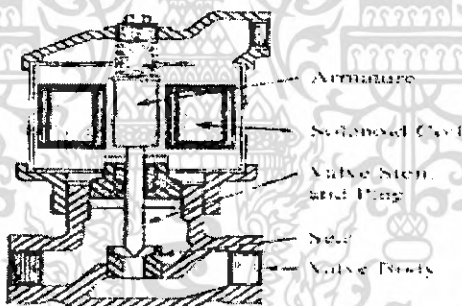
สเต็ปป์มอเตอร์ถูกขับให้หมุนโดยกระบวนการพัลส์ที่ได้รับจากขดลวดของคอลลีสนาม คุณลักษณะของพัลส์ (เช่น Rise time, Duration, Fall time และ Amplitude) ต้องสอดคล้องกับความ

เนื่องมอเตอร์เพื่ออาร์เมเจอร์หมุน 1 สเต็ป (เทียบกับมุมระหว่างฟัน 2 ฟันบนอาร์เมเจอร์) แต่สำหรับแต่ละพัลส์ ความเร็วของสเต็ปมอเตอร์ควบคุมโดยการปรับอัตราพัลส์

### 2.17.2 โซลินอยด์ (Solenoids)

โซลินอยด์ คือ ขดลวดที่ประกอบด้วยลวดที่พันรอบแกนทรงกระบอกหลาย ๆ รอบ เมื่อกระแสไฟฟ้าผ่านเข้าไปในขดลวดจะเกิดสนามแม่เหล็กขึ้น โดยมีขั้วเหนือ (N) และขั้วใต้ (S) อยู่ในแนวแกนที่ปลายแต่ละด้านของขดลวด เหล็กทรงกระบอกที่สอดอยู่ในแกนของโซลินอยด์จะตอบสนองต่อสนามแม่เหล็ก และเกิดแรงแม่เหล็กขึ้น แรงบนกลไก โซลินอยด์ขึ้นอยู่กับกระแสไฟฟ้า จำนวนรอบของขดลวด และรูปทรงเรขาคณิตของคอยล์

โซลินอยด์ใช้มากในการควบคุมวาล์ว โดยต่อส่วนที่เป็นเหล็กทรงกระบอก (Plunger) เข้ากับก้านวาล์ว (Valve stem) และสปริงคืนกลับ (Return spring)



รูปที่ 2.24 โซลินอยด์วาล์ว

## บทที่ 3

## การออกแบบและการสร้างเครื่องทดสอบ

## 3.1 การคำนวณชิ้นส่วนของเครื่องทดสอบ

## 3.1.1 การคำนวณหาขนาดมอเตอร์

ชุดทดสอบใช้ความเร็วสูงสุด 300 รอบ/นาที น้ำหนักที่ใช้ทดสอบกด 0-2 กิโลกรัม โดยสมมุติค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน ( $\mu$ ) เท่ากับ 0.3 รัศมีการกดสูงสุด 42 มิลลิเมตร

จากสมการในการคำนวณพื้นฐาน

$$F = \mu_k N$$

$\mu_k$  คือค่าสัมประสิทธิ์เมื่อการลื่นไถล (Slipping) ที่ผิวสัมผัสที่เกิดขึ้นขนาดของแรงเสียดทานจลน์เป็นสัดส่วน โดยตรงกับขนาดแรงที่ตั้งฉากกับพื้นผิว

$N$  คือขนาดของแรงกระทำตั้งฉาก

คำนวณหาแรงกระทำตั้งฉากได้จากสมการ

$$\sum M = 0$$

$$\sum F = 0$$

$$\sum M_A = 0 \text{ (ทวนเข็มนาฬิกา)}$$

$$R_B(19.6) - P(12.5) = 0$$

$$R_B = \frac{2 \times 9.81 \times 12.5}{19.6}$$

$$= 12.5$$

$$R_B = N = 12.5 \text{ นิวตัน}$$

เมื่อ

$$F = \mu_k N$$

แรงบิดที่เราได้ คือ

$$T = r \times F$$

$$T = 0.042 \times 12.5 \times 0.3$$

$$= 0.1575$$

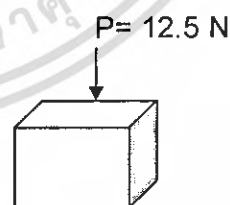
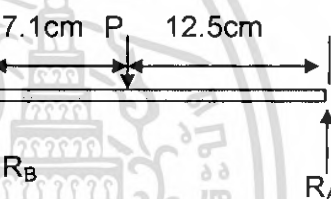
$$= 0.16 \text{ N.m}$$

นำค่าแรงบิดที่ให้มาคำนวณหาขนาดของมอเตอร์จะได้

$$P = 2\pi nT$$

$$= \frac{2\pi \times 300 \times 0.16}{60}$$

$$= 5.02$$



เลือกใช้มอเตอร์ขนาด 300 W แรงเคลื่อนไฟฟ้า 12 V เพื่อให้ง่ายต่อการควบคุมรอบการทำงานและสามารถปรับค่าความเร็วรอบได้โดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ เป็นตัวควบคุม

### 3.1.2 เพลาสังกาลัง

เพลามีการลดขนาดของหน้าตัด เมื่อถูกแรงบิดกระทำจะทำให้เกิดความเค้นเฉือนสูงสุดซึ่งจะหาได้

$$\text{จากสมการ} \quad \tau_{\max} = \frac{KTc}{J}$$

C คือรัศมีควมอกสุดของเพลาในช่วงของเพลามีหน้าตัดเล็กสุด

K คือค่าสัมประสิทธิ์ที่เกิดจากความสัมพันธ์ระหว่าง  $r/d, D/d$  ของเพลา

$$\text{เมื่อ } r/d=0.8/12 = 0.07$$

$$D/d=13/12 = 1.1$$

นำค่าไปพล็อตกราฟหาค่า K จะได้  $K=1.2$

$$\text{สำหรับเพลาดัน ค่า } J = \frac{\pi}{2} c^4$$

$$\therefore \tau_{\max} = \frac{2KTc}{\pi c^4}$$

$$\tau_{\max} = \frac{2KT}{\pi c^3}$$

$$= \frac{2(1.2)(0.16)}{\pi (6)^3} \times 1000 \quad \text{N/mm}^2$$

$$= 0.57 \quad \text{MPa}$$

จากตารางภาคผนวก รูปที่ 2 ข. จะได้  $\sigma_y = 250 \quad \text{MPa}$

จากความต้านแรงเฉือนคราก  $\tau_y = 0.6\sigma_y$

$$= 0.6 \times 250$$

$$= 150 \quad \text{MPa}$$

เนื่องจากค่าความเค้นเฉือนออกเบมมีค่าน้อยกว่าค่าแรงเฉือนครากมาก ๆ จึงสามารถใช้เพลาดังขนาดที่ออกเบมไว้ได้

### 3.1.3 คัปปลิง

เนื่องจากคัปปลิงเป็นตัวถ่ายทอคกำลังจากมอเตอร์ไปยังเพลา จึงเลือกใช้คัปปลิงสำเร็จรูป super flex coupling ซึ่งเป็นข้อต่อเพลายางที่สะดวกต่อการใช้งาน โดยมีข้อ 2 ข้างและยางยึดหุ้ม 1 ชั้นทำให้แรงบิดในตอนที่มีมอเตอร์เริ่มหมุนนิ่มนวล อีกทั้งยังสะดวกต่อการตั้งศูนย์และสามารถถอดประกอบได้ง่ายโดยสามารถเลือกใช้ได้จาก catalog ของตัวแทนจำหน่ายได้เลยในที่นี้เลือกใช้ SJ Coupling

### 3.1.4 การออกแบบหัวกด (Pin)

จะพิจารณาผลของการกระทำของแรง  $F$  ต่อแท่งวัตถุ จากการพิจารณาของพื้นที่หน้าตัดที่ใช้ต้านแรงกระทำขนานกับแรง เมื่อกำหนดให้ความเค้นเฉือนกระจายอย่างสม่ำเสมอบนพื้นที่หน้าเฉือน จะได้ว่า

$$\tau = \frac{V}{A}$$

$\tau$  คือ ค่าความเค้นเฉือนเฉลี่ย, MPa

$A$  คือ พื้นที่หน้าตัดเฉือนขนานกับแรง,  $\text{mm}^2$

$V$  คือ แรงเฉือน, N

ความเค้นเฉือนที่กระจายสม่ำเสมอ เมื่อแรงเฉือนลัพธ์  $V$  กระทำผ่านจุดเซนทรอยด์ของพื้นที่หน้าตัดเฉือน

$$V = N = 12.5 \text{ นิวตัน (พื้นที่หน้าตัดเฉือนขนานกับแนวแรง)}$$

$$\tau_{\max} = \tau = 0.57 \text{ MPa}$$

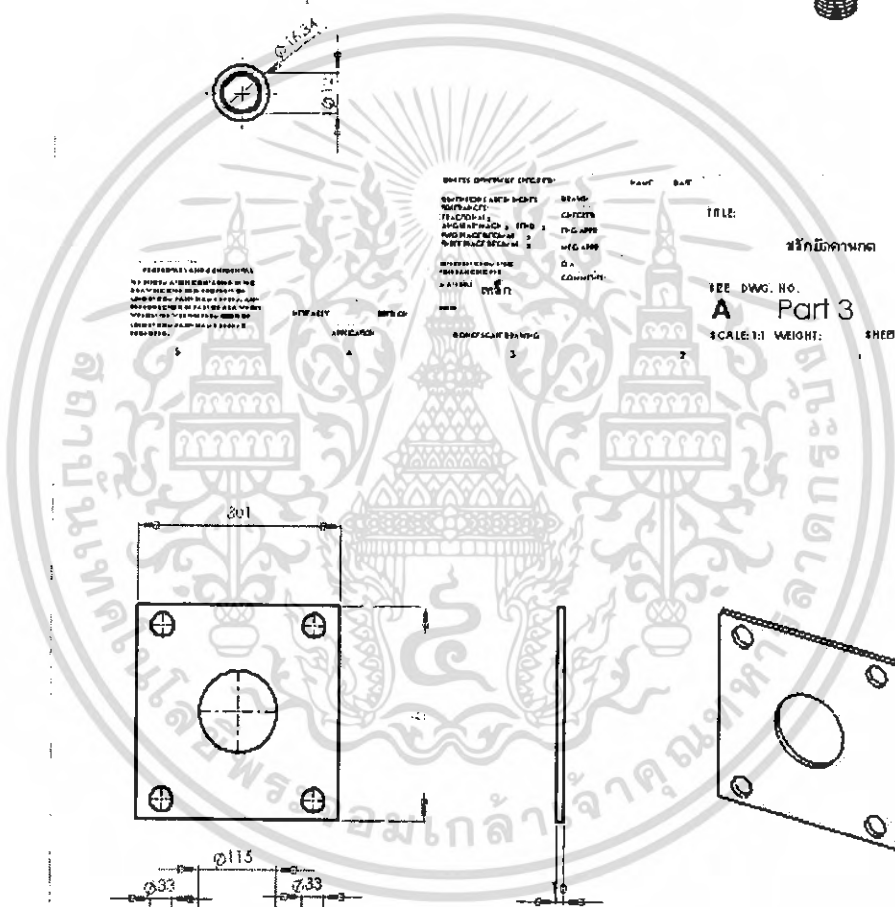
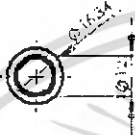
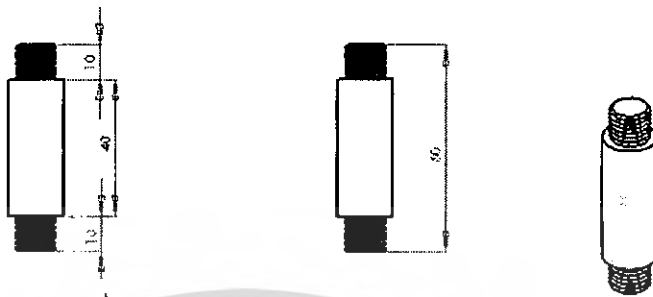
แทนค่าในสูตรจะได้

$$\begin{aligned} A &= \frac{12.5}{0.57} \\ &= 22 \text{ mm}^2 \\ \therefore a &= 4.68 \text{ mm} \\ &= 5 \text{ mm} \end{aligned}$$

### 3.1.5 การสร้างเครื่องทดสอบ

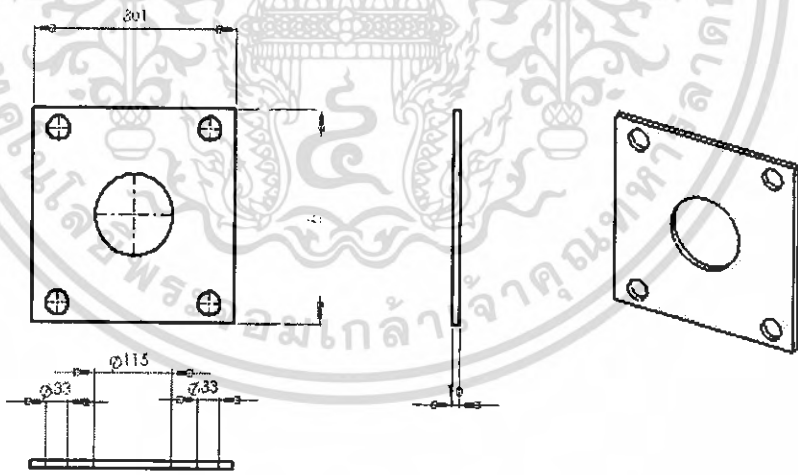
หลังจากได้มีการเขียนแบบเป็นที่เรียบร้อยแล้วขั้นตอนนี้ต่อไปก็คือการลงมือสร้างเครื่องทดสอบให้มีลักษณะตามที่ได้กำหนดไว้เริ่มตั้งแต่การแปรรูปวัสดุ เช่น การกลึงงานตามแบบให้ได้ขนาดตามต้องการ จัดซื้ออุปกรณ์สำเร็จรูปตามแหล่งต่างๆ แล้วนำมาประกอบรวมกันตามแบบที่ได้เขียนไว้





UNITS DIMENSIONS IN METERS  
 DIMENSIONS AND TOLERANCES  
 FINISHES  
 MATERIALS  
 SURFACE TREATMENTS  
 PARTS LIST  
 MANUFACTURING  
 DRAWING

DATE: \_\_\_\_\_  
 TITLE: **หลักยึดคานาคัด**  
 SEE DWG. NO. **A Part 3**  
 SCALE: 1:1 WEIGHT: \_\_\_\_\_ SHEET 1 OF 1



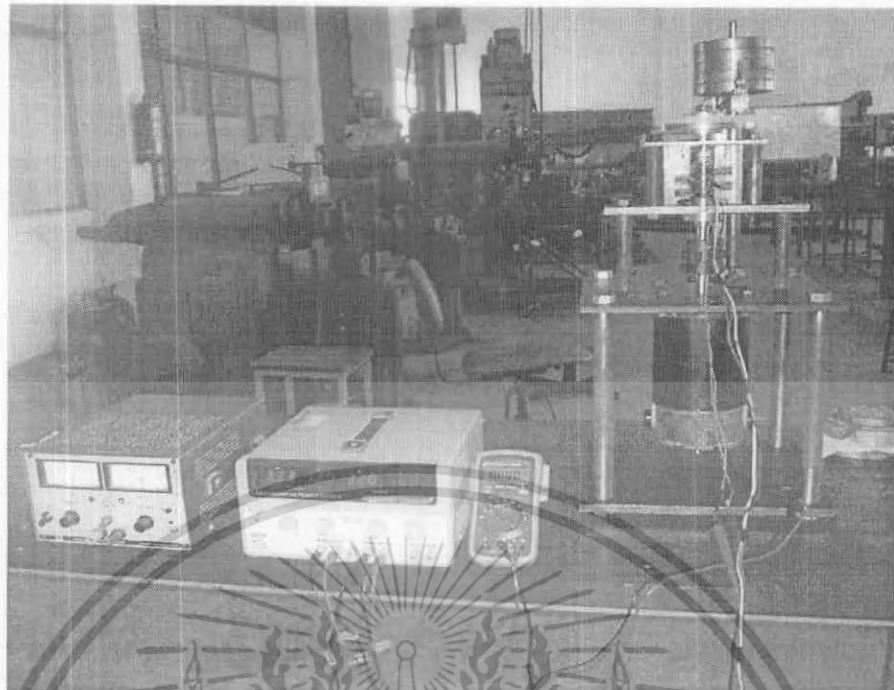
UNITS DIMENSIONS IN METERS  
 DIMENSIONS AND TOLERANCES  
 FINISHES  
 MATERIALS  
 SURFACE TREATMENTS  
 PARTS LIST  
 MANUFACTURING  
 DRAWING

DATE: \_\_\_\_\_  
 TITLE: **แผ่นยึดคานาตัวเชื่อม**  
 SEE DWG. NO. **A Part 4**  
 SCALE: 1:1 WEIGHT: \_\_\_\_\_ SHEET 1 OF 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้





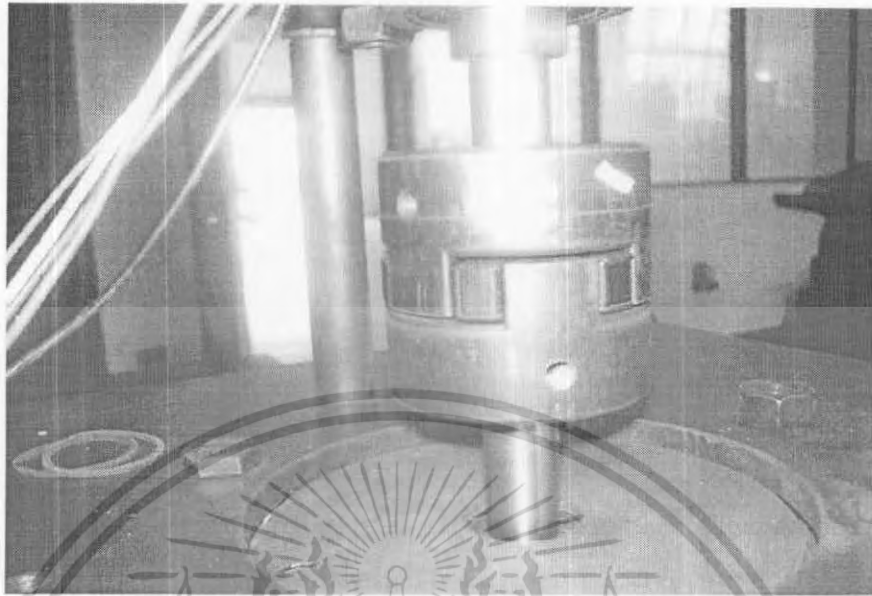


รูปที่ 3.1 โครงสร้างทั้งหมด



รูปที่ 3.2 ชุดจานและตัวอย่างพลาสติก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.3 coupling ตั้งผ่านกำลังและเพลลาบ



รูปที่ 3.4 มอเตอร์กระแสตรง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.5 นาหนักที่ทดสอบ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 4 วิธีการทดลองและผลการทดลอง

### 4.1 วิธีการทดลองที่ 1

- 4.2.1 หัวกดเป็นแบบ PP และแผ่นดิสก์เป็น PE
- 4.2.2 ประกอบชุดอุปกรณ์การทดลองโดยที่ยังไม่ใช้น้ำหนักกด
- 4.2.3 เปิดสวิตช์ ON ที่แหล่งจ่ายปรับให้มอเตอร์ทำงาน โดยการปรับแรงดัน โวลต์
- 4.2.4 ใส่น้ำหนักกดลงบนแกนกด
- 4.2.5 จากนั้นใส่น้ำหนักกดตามที่ต้องการลงบนแกนกด
- 4.2.6 ปรับตัวปรับตำแหน่งแกนกดให้กดลงไปช้าๆ
- 4.2.7 ใช้เครื่องมือวัดรอบ วัดความเร็วรอบให้ได้ตามกำหนด
- 4.2.8 จับเวลาให้ได้ตามรอบของการทดลองที่กำหนดไว้
- 4.2.9 เมื่อได้จำนวนรอบของการทดลองแล้วปรับตำแหน่งที่ตัวปรับตำแหน่งให้แกนกดยกก่อน  
น้ำหนักขึ้น
- 4.2.10 ปิดสวิตช์แหล่งจ่าย
- 4.2.11 เอาหัวกดออกจากชุดทดลองแล้วนำไปชั่งหาน้ำหนักที่เสียไป และบันทึกค่าต่างๆ ไว้
- 4.2.12 ทำการทดลองเหมือนเดิมแต่เปลี่ยนจำนวนรอบตามที่กำหนด
- 4.2.13 เปลี่ยนน้ำหนักกดใหม่และทดลองตามความเร็วรอบที่กำหนดไว้
- 4.2.14 นำผลการทดลองที่ได้มาพล็อตกราฟเปรียบเทียบการสึกหรอ

### 4.2 วิธีการทดลองที่ 2

- 4.2.1 ใช้หัวกดเป็นแบบ PP และใช้งานหมุนเป็นเหล็ก
- 4.2.2 วิธีการทดลองเป็นเช่นเดียวกับวิธีการทดลองที่ 1
- 4.2.3 นำผลการทดลองที่ได้มาพล็อตกราฟเปรียบเทียบการสึกหรอ

### 4.3 วิธีการทดลองที่ 3

- 4.3.1 ใช้หัวกดเป็นชนิด PP และใช้งานกดเป็นชนิด PE
- 4.3.2 ทำการทดลองเช่นเดียวกับการทดลองที่ 1 และทดลองที่ 2 แต่ปรับค่าความเร็วรอบของ  
มอเตอร์ให้ได้ตามที่ต้องการ
- 4.3.4 หลังจากนั้นเมื่อได้ค่าต่างๆครบแล้วนำค่าต่างๆ มาพล็อตกราฟเปรียบเทียบค่าการสึกหรอ  
ระหว่างจำนวนรอบกับน้ำหนักที่สึกหรอของหัวกด

#### 4.4 วิธีการทดลองที่ 4

- 4.4.1 ใช้หั่วกดเป็นแบบ PP และใช้จานหมุนเป็นเหล็ก
- 4.4.2 วิธีการทดลองเป็นเช่นเดียวกับวิธีการทดลองที่
- 4.4.3 นำผลการทดลองที่ได้มาพล็อตกราฟเปรียบเทียบการสึกหรอ

#### 4.5 วิธีการทดลองที่ 5

- 4.5.1 ใช้หั่วกดเป็น PP จานหมุนเป็น PE
- 4.5.2 วิธีการทดลองเป็นเช่นเดียวกับวิธีการทดลองที่ผ่านมา
- 4.5.3 แต่ปรับ Pin ให้ได้ตามรัศมีต่างๆ
- 4.5.4 บันทึกผลการทดลอง

#### 4.6 วิธีการทดลองที่ 6

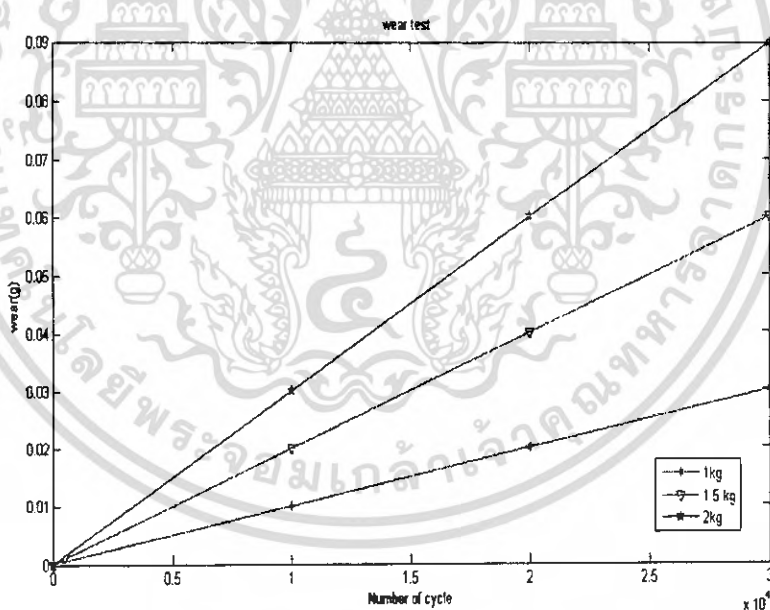
- 4.6.1 ทำเหมือนกับการทดลองที่ 5
- 4.6.2 ใช้หั่วกดเป็น PP จานหมุนเป็นเหล็ก
- 4.6.3 แต่ปรับ Pin ให้ได้ตามรัศมีตามที่กำหนด
- 4.6.4 บันทึกผลการทดลอง



ผลการทดลองที่ 1 เปรียบเทียบระหว่าง หัวกดเป็น Polypropylene งานเป็น Polyethylene  
โดยใช้จำนวนรอบ 10,000 20,000 30,000 รอบ น้ำหนักกด 1,1.5,2 Kg

นน.กด	นน.จริง	W0	W1	W2	W3
1.00 kg	0.60	1.39	1.38	1.37	1.36
1.50 kg	0.95	1.39	1.37	1.35	1.33
2.00 kg	1.20	1.39	1.36	1.33	1.30
จำนวนรอบ	-	-	10000	20000	30000

กราฟที่ 1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการสึกหรอกับจำนวนรอบ  
(หัวกดเป็น Polypropylene และงานหมุนเป็น Polyethylene)

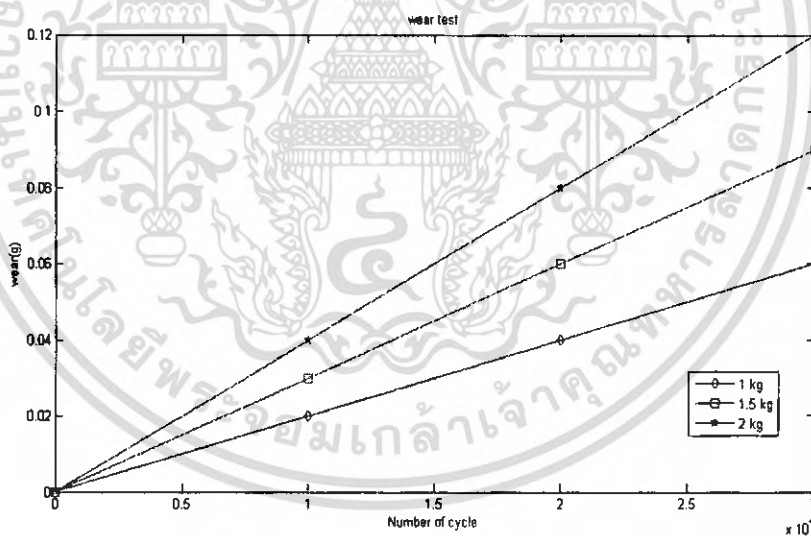


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการทดลองที่ 2 เปรียบเทียบระหว่าง หัวกดเป็น Polypropylene งานเป็นเหล็ก  
โดยใช้จำนวนรอบ 10,000 20,000 30,000 รอบ น้ำหนักกด 1,1.5,2 Kg

นน.กด	นน.จริง	W0	W1	W2	W3
1.00 kg	0.60	1.39	1.37	1.35	1.33
1.50 kg	0.95	1.39	1.36	1.33	1.30
2.00 kg	1.20	1.39	1.35	1.31	1.27
จำนวนรอบ	-	-	10000	20000	30000

กราฟที่ 2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการสึกหรอกับจำนวนรอบ  
(หัวกดเป็น Polypropylene และงานหมุนเป็นเหล็ก)

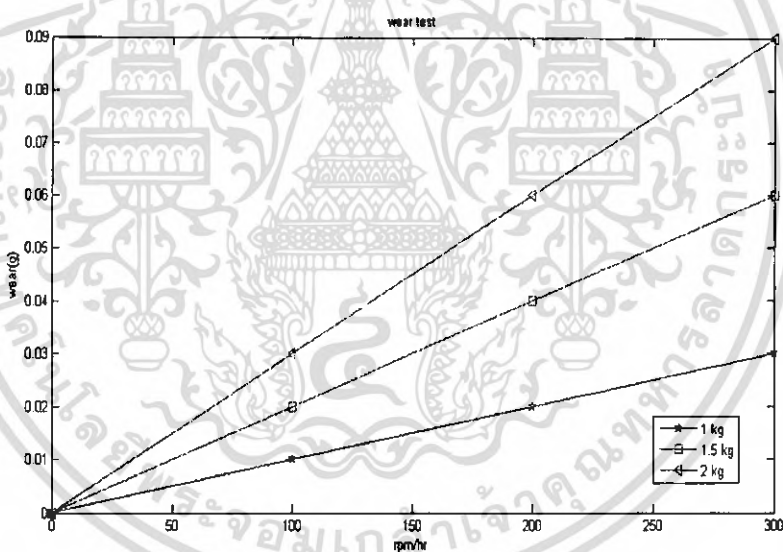


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการทดลองที่ 3 เปรียบเทียบระหว่าง หัวกดเป็น Polypropylene งานเป็น Polyethylene  
โดยใช้ความเร็วรอบมอเตอร์ 100,200,300 รอบ/นาทีและน้ำหนักกด 1,1.5,2 Kg ใช้เวลาในการทดสอบต่อ 1 ชั่วโมง

	W1	W2	W3	
1kg	0.01	0.02	0.03	100rpm
1.5kg	0.02	0.04	0.06	200rpm
2kg	0.03	0.06	0.09	300rpm

กราฟที่ 3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการสึกหรอกับความเร็วรอบ  
(หัวกดเป็น Polypropylene และงานหมุนเป็น Polyethylene)

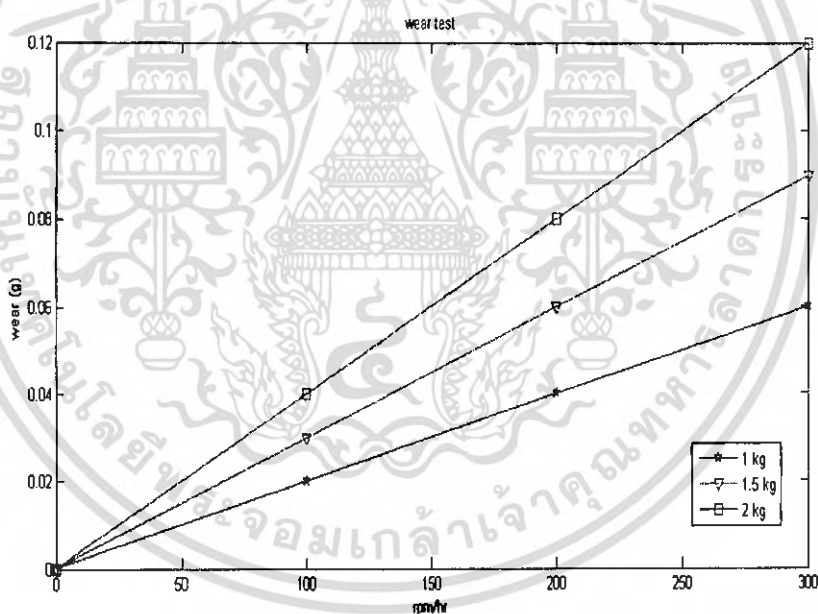


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการทดลองที่ 4 เปรียบเทียบระหว่าง หัวกดเป็น Polypropylene งานเป็นเหล็ก  
โดยใช้ความเร็วรอบ 100,200,300 รอบ/นาที กับน้ำหนักกด 1,1.5,2 Kg และใช้เวลาในการทดสอบต่อ 1 ชั่วโมง

	W1	W2	W3
100rpm	0.02	0.04	0.06
200rpm	0.03	0.06	0.09
300rpm	0.04	0.08	0.12

กราฟที่ 4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการสึกหรอกับความเร็วยรอบ  
(หัวกดเป็น Polypropylene และงานหมุนเป็นเหล็ก)



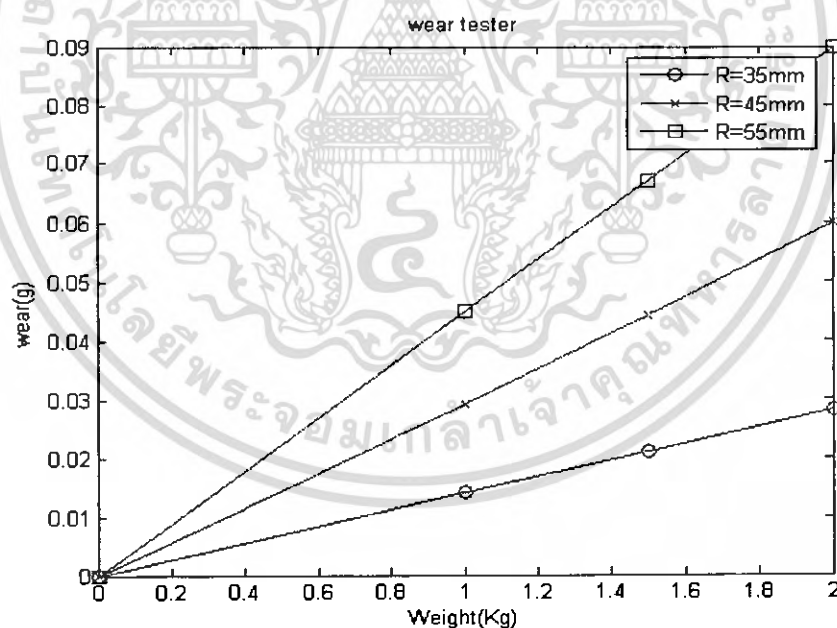
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการทดลองที่ 5 เปรียบเทียบระหว่าง หัวกดเป็น Polypropylene งานเป็น Polyethylene

	35mm	45mm	55mm
1kg	0.014	0.022	0.030
1.5kg	0.029	0.045	0.060
2kg	0.045	0.067	0.090

กราฟที่ 5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างรัศมีของกรวด 35,45,55 mm น้ำหนักกด 1,1.5,2 Kg และใช้

ความเร็วรอบในการทดสอบ 300 รอบ/นาที  
(หัวกดเป็น Polypropylene และงานหมุนเป็น Polyethylene)

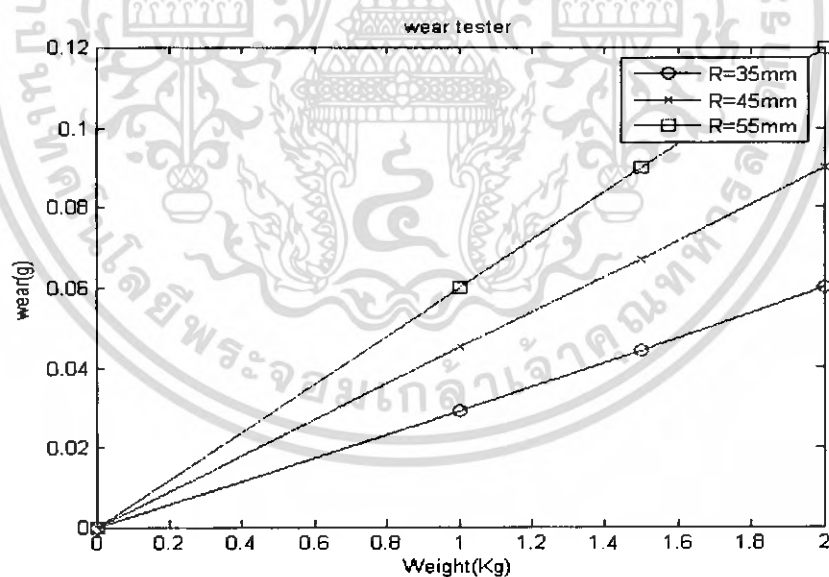


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการทดลองที่ 6 เปรียบเทียบระหว่าง หัวกดเป็น Polypropylene งานเป็นเหล็ก

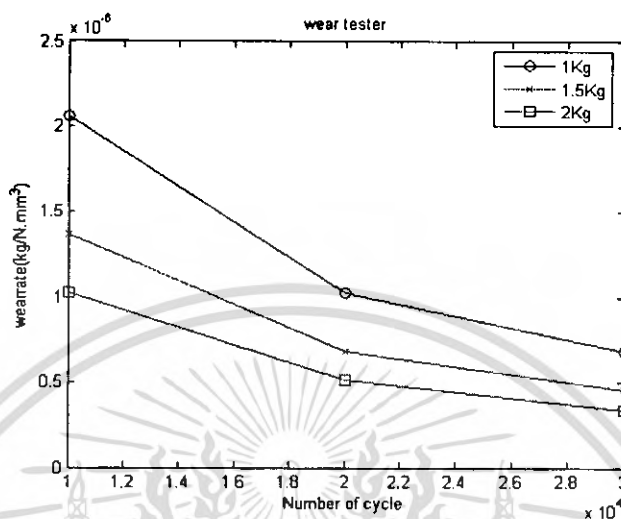
	35mm	45mm	55mm
1kg	0.028	0.045	0.060
1.5kg	0.030	0.066	0.090
2kg	0.060	0.090	0.120

กราฟที่ 6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างรัศมีของกรวด 35,45,55 mm น้ำหนักกด 1,1.5,2 Kg และความเร็วรอบในการทดสอบ 300 รอบ/ นาที (หัวกดเป็น Polypropylene และงานหมุนเป็นเหล็ก)

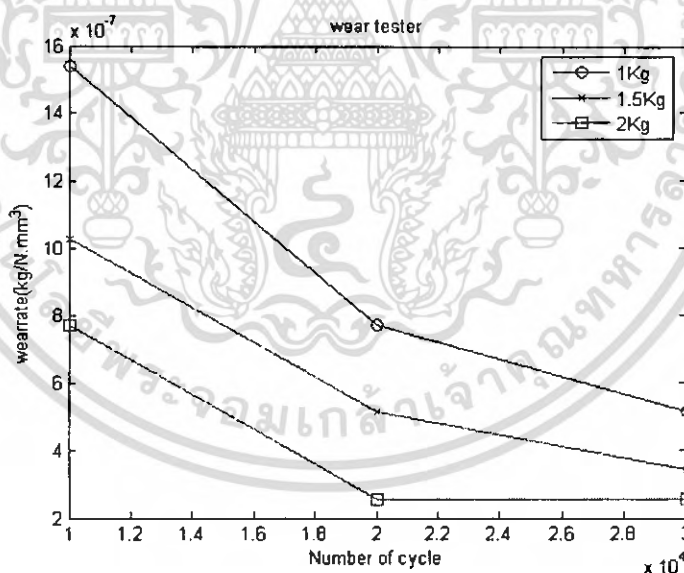


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กราฟที่ 7 เปรียบเทียบอัตราการสึกหรอหัวกดแบบ Polypropylene กับ จานหมุน Polyethylene



กราฟที่ 8 เปรียบเทียบอัตราการสึกหรอ หัวกดแบบ Polypropylene และจานหมุนแบบ เหล็ก



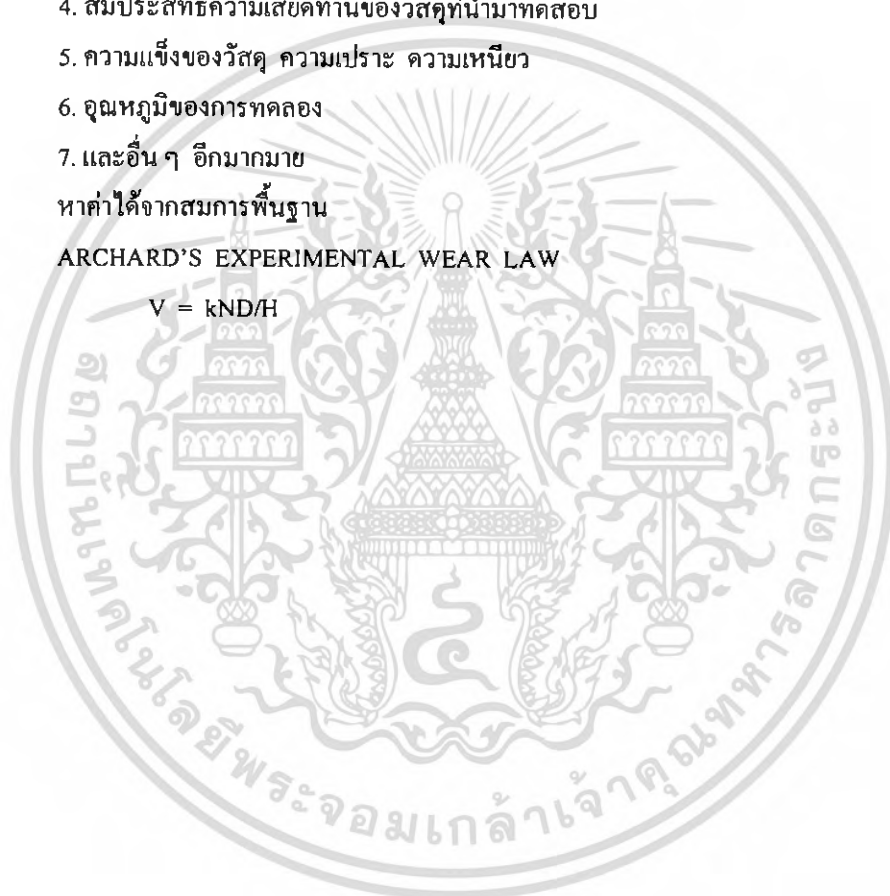
เมื่อมีการเปรียบเทียบ กราฟที่ 7 และ 8 พบว่าค่าอัตราการสึกหรอเมื่อ Polypropylene เสียดสีกับเหล็ก จะได้อัตราการสึกหรอที่มากกว่า Polypropylene กับ Polyethylene ซึ่งจะเกิดจากปัจจัยต่างๆดัง กราฟที่ 7,8 เปรียบเทียบค่าอัตราการสึกหรอ  $K(\text{kg/N mm}^3)$  เมื่อกำหนดให้ปริมาตร (V) เป็นค่าคงที่และ แรงกระทำต่อพื้นที่หน้าตัดเปลี่ยนแปลงลงตามน้ำหนักที่ใช้ในการกด และระยะทางที่ใช้

10,000,20,000,30,000 รอบและความเร็วที่ใช้ 0.22 เมตร/วินาที จากกราฟแสดงได้ว่าอัตราการสึกหรอมีค่าลดลงตามระยะทางที่กำหนดให้ จะพิจารณาได้ว่า วัสดุที่นำมาทดสอบเป็นประเภทพอลิเมอร์ชนิด Polypropylene มีการเสียดสีกับเหล็กและ Polyethylene โดยไม่มีการหล่อลื่นจะมีค่าตัวแปรที่ส่งผลกระทบต่อการศึกษาหรือดังนี้

1. ภาระที่ใช้ในการทดสอบ
  2. ความเร็วในการทดสอบ
  3. ความเรียบหรือหยาบของผิวสัมผัส
  4. สัมประสิทธิ์ความเสียดทานของวัสดุที่นำมาทดสอบ
  5. ความแข็งของวัสดุ ความเปราะ ความเหนียว
  6. อุณหภูมิของการทดลอง
  7. และอื่นๆ อีกมากมาย
- หาค่าได้จากสมการพื้นฐาน

ARCHARD'S EXPERIMENTAL WEAR LAW

$$V = kND/H$$



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 5

### บทสรุป ข้อเสนอแนะและวิจารณ์ผลการทดลอง

#### 5.1 สรุปผลการทดลอง

5.1.1 จากกราฟผลการทดลองที่ 1 หัวคดเป็น PP ใช้จานหมุนเป็น PE โดยให้จานหมุน หมุนด้วยความเร็วคงที่ แต่ปรับจำนวนรอบของการทดลองตามที่ได้กำหนดไว้รวมทั้งปรับภาระบนหัวคดตามที่กำหนดไว้เช่นกัน จากกราฟจะเห็นว่าค่าของการสึกหรอจะเพิ่มขึ้นเป็นลักษณะเชิงเส้นตามจำนวนรอบที่เพิ่มขึ้น และเมื่อเราเพิ่มภาระมากขึ้นการสึกหรอก็จะเพิ่มขึ้นตามไปด้วยแสดงให้เห็นว่าการสึกหรอของพลาสติก ขึ้นอยู่กับปริมาณของภาระที่มากกระทำและระยะเวลาในการใช้งาน ทั้งนี้การสึกหรอที่เกิดขึ้นจะเกิดจากการสัมผัสกันโดยตรงของหน้าสัมผัสของวัสดุทดสอบทำให้เกิดแรงเสียดทานด้านการเคลื่อนที่ทางด้านการหมุน และจากการทดลองดังกล่าวเมื่อวัสดุเสียดสีกันโดยตรงโดยไม่มีการหล่อลื่น (dry friction) จะทำให้ชิ้นทดสอบเกิดการสึกหรอขึ้น

5.1.2 จากกราฟผลการทดลองที่ 2 หัวคดเป็น PP จานหมุนเป็นเหล็กจากกราฟผลการทดลองดังกล่าวจะเห็นว่าเกิดการสึกหรอของวัสดุชนิด PP มากเมื่อเทียบกับการทดลองที่ 1 ทั้งนี้เป็นเพราะว่าเมื่อเกิดการเสียดทานแห้งระหว่างวัสดุที่เป็น โลหะกับพลาสติก จะทำให้พลาสติกสึกหรอเร็วขึ้น เป็นเพราะผิวสัมผัสของเหล็กจะมีความหยาบและความแข็งของผิวมากกว่าพลาสติกจึงทำให้พลาสติกสึกหรอมากขึ้น

5.1.3 จากกราฟผลการทดลองที่ 3,4 เมื่อเปลี่ยนมาใช้ความเร็วรอบต่างๆ โดยใช้เวลาในการทดลองเท่ากัน จะทำให้เกิดการสึกหรอใกล้เคียงกับการทดลองที่ 1,2

5.1.4 จากกราฟผลการทดลองที่ 5,6 เมื่อเรามาเปลี่ยนมาปรับรัศมีของการทดลองที่รัศมีต่างๆ จะได้กราฟการสึกหรอเช่นเดียวกัน

ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าเมื่อมีการเสียดสีระหว่างวัสดุที่มีคุณสมบัติใกล้เคียงกัน และวัสดุที่มีคุณสมบัติแตกต่างกัน วัสดุที่มีคุณสมบัติแตกต่างกันมากจะทำให้การสึกหรอเกิดขึ้นรวดเร็วกว่าวัสดุที่มีคุณสมบัติใกล้เคียงกันเป็นเพราะว่าพลาสติกที่ใช้ทดสอบมีความอ่อนนุ่มของผิวมากกว่า จึงสูญเสียเนื้อหลักให้กับเหล็กจำนวนมาก ทำให้เกิดการสึกหรออย่างรวดเร็ว ตัวแปรที่สำคัญอีกตัวคือความร้อน เมื่อเกิดการเสียดสีแห้งจะให้ความร้อนเพิ่มขึ้น ทำให้พลาสติกเกิดการเสียดรูปร่างและสึกหรอเพิ่มขึ้น เพราะฉะนั้นวิธีการที่จะสามารถลดการสึกหรอของชิ้นส่วนหรืออุปกรณ์ได้นั้นกระทำได้โดยการหล่อลื่นวัสดุเพื่อลดแรงเสียดทานและระบายความร้อนให้กับชิ้นส่วน รวมทั้งการเลือกใช้วัสดุให้เหมาะสม จะทำให้อายุการใช้งานของวัสดุยาวนานขึ้น

## 5.2 วิจารณ์ผลการทดลองและวิเคราะห์ปัญหาผลการทดลอง

### 5.2.1 ปัญหาของโครงสร้างอุปกรณ์

- เครื่องมือที่ใช้ในการสร้างอุปกรณ์การทดลองไม่อยู่ในสภาพที่ใช้งานได้ดี ทำให้อุปกรณ์ที่สร้างขึ้นมีความผิดพลาดสูงจึงเป็นไปได้ยากที่จะสร้างอุปกรณ์ให้ได้ตามที่ออกแบบไว้ ทำให้เสียเวลาในการสร้างอุปกรณ์มาก

- ขนาดที่ออกแบบไว้ไม่เหมาะสมสำหรับการทดลอง เช่นขนาดของเพลลาที่จะทำการวัดแรงบิดมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางโตเกินไป ทำให้ไม่สามารถวัดค่าแรงบิดได้

- มีข้อจำกัดของการปฏิบัติงานและการเลือกวัสดุที่เหมาะสมเช่น

- เหล็กเหนียว ในการขึ้นรูปเพลลาอาจจะทำให้เพลลาแตกได้และจะส่งผลไปยังงานหมุนทำให้การหมุนไม่สมดุล

- เหล็กแข็ง ขึ้นรูปยากตอนขึ้นรูปจะต้องหล่อเย็นตลอดเวลา และความยืดหยุ่นต่ำเป็นสาเหตุให้ที่แรงบิดค่าไม่สามารถที่จะวัดค่าแรงบิดได้

- อลูมิเนียม ขึ้นรูปง่ายแต่จะต้องมีขนาดที่โตขึ้น สามารถอ่านค่าแรงบิดที่แรงบิดค่าได้ แต่วัสดุที่ใช้ทำมีราคาแพง

- ความยาวของเพลลาในส่วนที่จะวัดแรงบิด มีระยะหรือความยาวน้อยเกินไปทำให้ติดตั้งอุปกรณ์ในการวัดและอุปกรณ์อื่นลำบาก

## 5.3 ปัญหาของมอเตอร์ส่งกำลัง ( ดีซี 12 โวลต์)

5.2.1 มอเตอร์ที่ใช้ในการทดลอง ให้แรงบิดค่ามากเมื่อเราใส่ภาระมากๆ มอเตอร์จะไม่ทำงานหรือหมุนได้น้อยทำให้ไม่สามารถวัดค่าได้

5.2.2 ถ้าต้องการให้ได้แรงบิดมากๆ จะต้องเพิ่มแรงดัน( โวลต์)ให้กับมอเตอร์เพิ่มมากขึ้น ซึ่งในทางปฏิบัติแล้วเป็นไปได้ยากเพราะมอเตอร์เป็นแบบ กระแสตรง ดีซี 12 โวลต์ ถ้าเราปรับเพิ่มมากเกินไปอาจจะทำให้ตัวมอเตอร์เสียหายได้ และความเร็วรอบที่ได้ก็จะเพิ่มมากขึ้นซึ่งไม่ใช่สิ่งที่เราต้องการ

5.2.3 อีกกรณีของการเพิ่มแรงบิดให้สูงขึ้นโดยการเพิ่มกระแส โดยการปรับกระแสจากแหล่งจ่าย (supply) แต่มีข้อจำกัดที่ว่าแหล่งจ่ายที่ใช้ไม่สามารถปรับค่ากระแสตามที่ต้องการได้

## 5.4 ปัญหาของเครื่องมือวัด

5.4.1 เครื่องมือวัดรอบ การวัดรอบการหมุนของอุปกรณ์ ไม่สามารถวัดค่าที่แน่นอนได้จึงทำให้ค่าที่อ่านได้มีความผิดพลาดสูง เมื่อลองใช้เครื่องมือวัดรอบสองตัวในการวัดเปรียบเทียบกันค่าที่อ่านได้ไม่เท่ากันแสดงว่าความผิดพลาดของเครื่องมือวัดสูงมาก

5.4.2 เครื่องมือวัดแรงบิด (Torque cell) เมื่ออุปกรณ์ในการทดลองให้แรงบิดค่าไม่สามารถที่จะวัดค่าของแรงบิดได้ อีกสาเหตุหนึ่งเกิดมาจากการออกแบบเพลลา ซึ่งมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางโตเกินไปเพลลาไม่เกิดการบิดตัว ทำให้เครื่องมือวัดไม่สามารถอ่านค่าออกมาได้

## 5.5 ข้อเสนอแนะ

### 5.5.1 อุปกรณ์โครงสร้าง

ควรใช้เครื่องมือที่มีคุณภาพในการขึ้นรูปอุปกรณ์ หรือใช้เครื่องมือที่มีมาตรฐานมากขึ้น

- เลือกใช้วัสดุที่ค่อนข้างเหนียวและมีจุดครากต่ำเพื่อที่จะทำให้สามารถวัดค่าแรงบิดได้
- การออกแบบส่วนของเพลลาที่ต้องการวัดค่าแรงบิดจะต้องเล็กลง แต่ต้องคำนึงถึงภาระที่เหมาะสม
- ขนาดของเพลลาส่วนที่จะติดตั้งอุปกรณ์วัดแรงบิดควรจะมีขนาดของความยาวให้มากขึ้น เพื่อช่วยต่อการติดตั้งเครื่องมือวัด

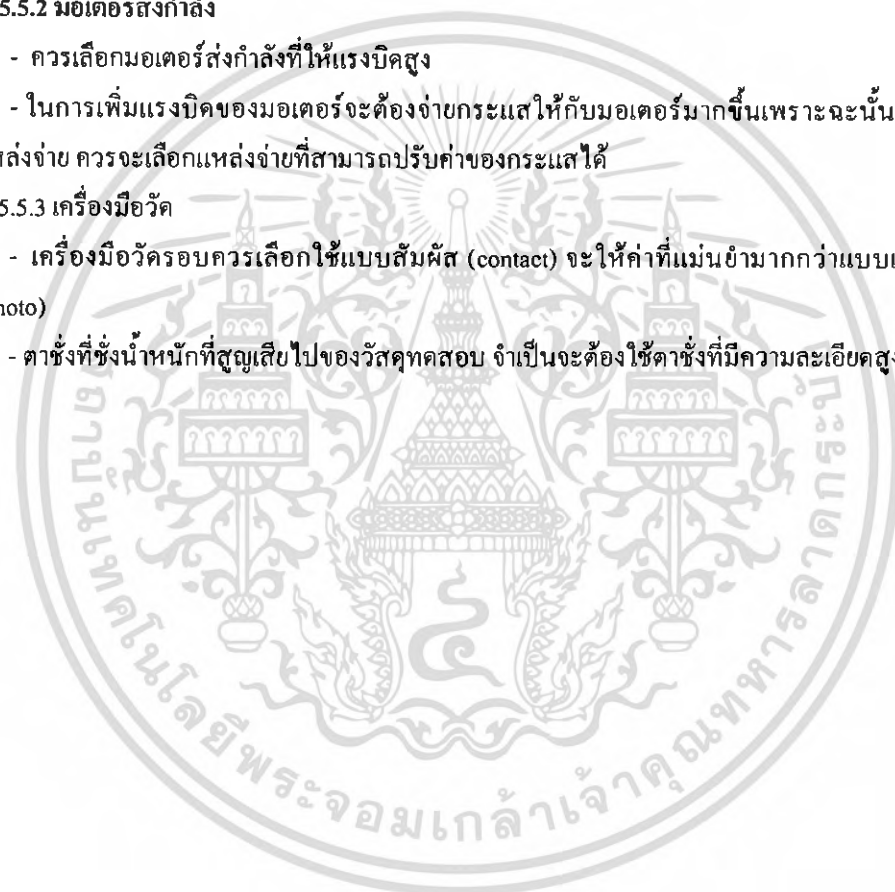
การติดตั้งเครื่องมือวัด

### 5.5.2 มอเตอร์ส่งกำลัง

- ควรเลือกมอเตอร์ส่งกำลังที่ให้แรงบิดสูง
- ในการเพิ่มแรงบิดของมอเตอร์จะต้องจ่ายกระแสให้กับมอเตอร์มากขึ้นเพราะฉะนั้นในการเลือกแหล่งจ่าย ควรจะเลือกแหล่งจ่ายที่สามารถปรับค่าของกระแสได้

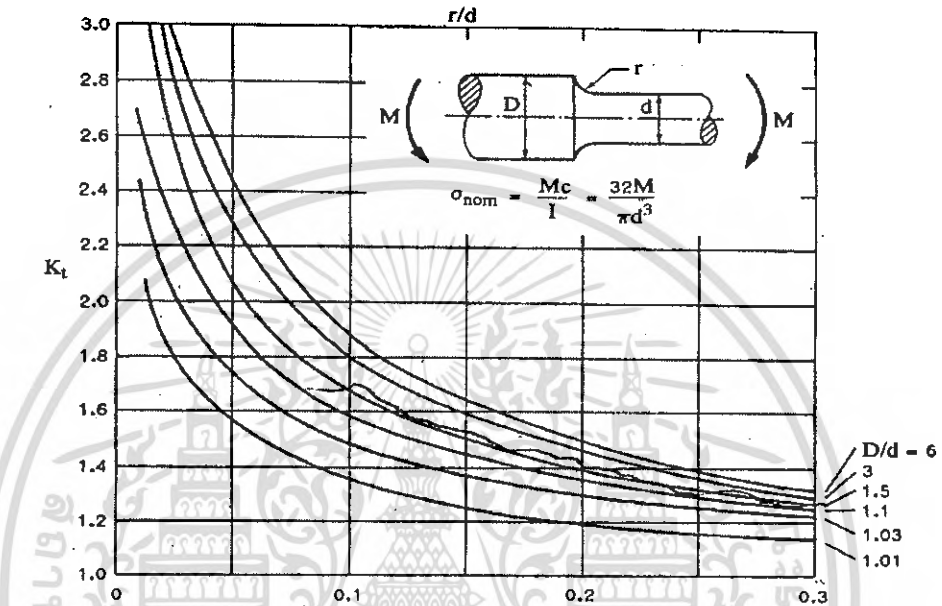
### 5.5.3 เครื่องมือวัด

- เครื่องมือวัดควรเลือกใช้แบบสัมผัส (contact) จะให้ค่าที่แม่นยำมากกว่าแบบแสงสะท้อน (photo)
- ตาชั่งที่ชั่งน้ำหนักที่สูญเสียไปของวัสดุทดสอบ จำเป็นจะต้องใช้ตาชั่งที่มีความละเอียดสูง

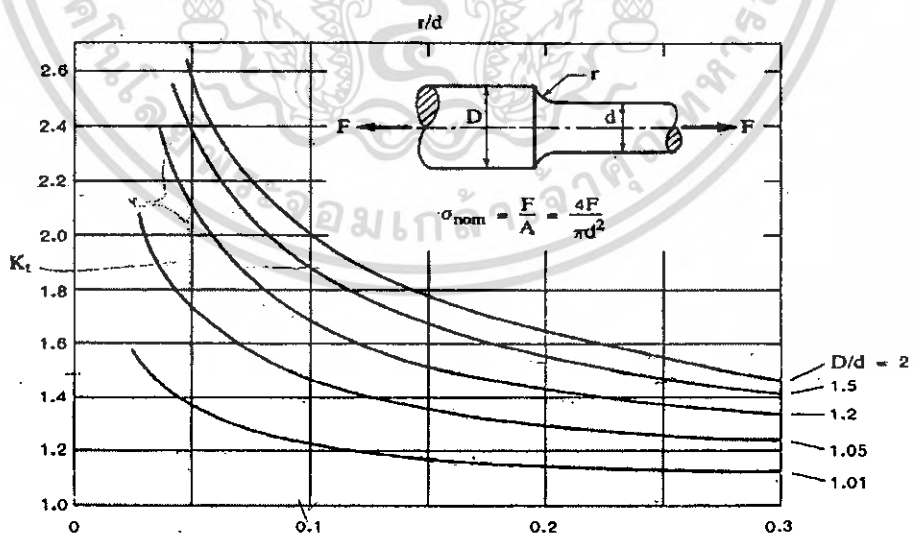


ภาคผนวก

รูปที่ 1 เพลงที่มีฟิเลต

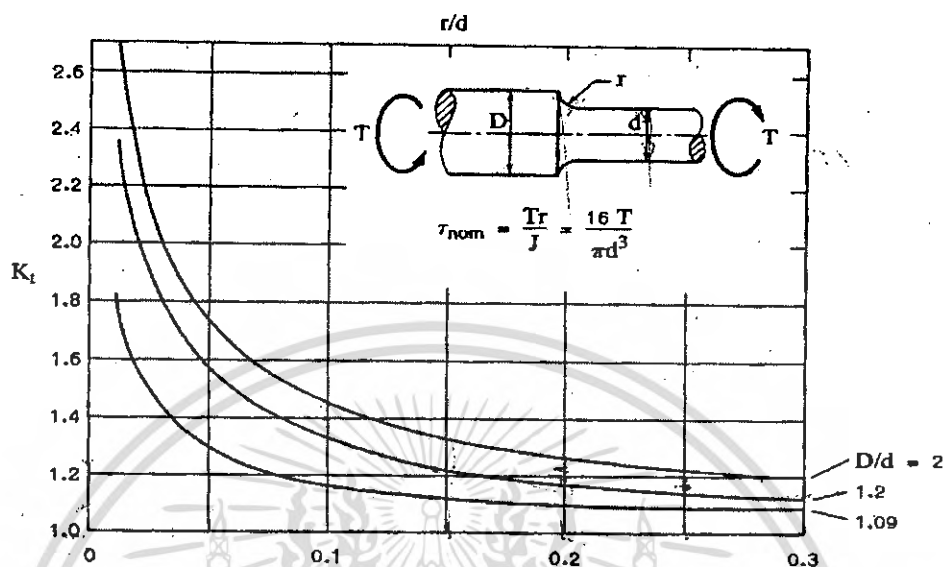


(ก) อยู่ภายใต้แรงอัด



(ข) อยู่ภายใต้แรงดึง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ค) อยู่ภายใต้แรงบิด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.15 คุณสมบัติของพลาสติกบางชนิด (properties of some typical plastics)

โพลีเอทิลีน ชนิด หลากหลาย																							
ABS	5	8	2.4	-	-	-	-	3.2-5.8	140-250	-	0.1-0.3	Slow	G	-	-	-	-	G	E	F	G	-	
Styrenes, high-impact	4.3	1	2.5	-	-	-	-	2.2-5.6	128-185	-	0.03-0.02	Slow	G	-	-	-	-	G	E	P	F	-	
Polypropylenes	5.5	1	1.75	-	-	-	-	3.4-6.2	230-320	-	0.01-0.03	Slow	G	-	-	-	-	E	E	G	E	-	
Polypropylenes, high-density	4.9	12	2	-	-	-	-	6.6-10.7	170-280	-	<0.01	very Slow	E	-	-	-	-	E	E	C	G	-	
Cellulose Acetate Butyrates	5.5	2.1	1.3	-	-	-	-	6-10	140-220	-	0.0-2.8	Slow	E	-	-	-	-	P	P	P	G	-	
Acrylics, modified	5.5	2	2.8	-	-	-	-	3-8	140-195	-	0.2-0.4	Slow	E	-	-	-	-	G	E	F	F	-	
Acrylics-PVC alloy	6.5	1.5	4	-	-	-	-	3.5	165	-	0.06	Non-burn.	E	-	-	-	-	E	E	E	E	-	
Polyester-Glass	16.5	15	18	-	-	-	-	1-1.4	200-550	-	0.1-2	Slow to nil	G	-	-	-	-	G	F	G	E	-	
Epoxy-Glass	3.6	12.5	25	-	-	-	-	0.3-0.6	250-400	-	0.02-0.08	Slow to nil	G	-	-	-	-	G	E	E	E	-	
โพลีพรอพิลีน ความแข็งแตกต่างกัน หลากหลาย ประสิทธิภาพ คุณสมบัติอื่น ๆ เป็นต้น																							
TPE	-	-	-	1-2.5	250	-	7	3.5	-	1.7	None	-	-	-	-	-	No	0.04	0.04	-	-	-	-
FEP	-	-	0.95	0.8-0.9	<250	-	3.2	4.8	-	1.4	<0.01	-	-	-	-	-	No	0.08	0.08	-	-	-	-
TPE fabric	-	-	-	5.50	-	-	-	8	-	1.7	None	-	-	-	-	-	No	0.02-0.25	0.02-0.25	-	-	-	-
Pilled TPE	-	-	1.2-2	5-35	>250	-	8-26	9-9.7	-	1.7-20	None	-	-	-	-	-	No	0.16-0.28	0.06	-	-	-	-

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.15 (ต่อ) คุณสมบัติของพลาสติกบางชนิด

วัสดุที่ทนความร้อน																															
Material	Softening Point (°C)		Melting Point (°C)		Density (g/cm³)	Tensile Strength (MPa)	Elongation (%)	Modulus (GPa)	Heat Deflection Temp. (°C)	Thermal Stability (h @ °C)	Flammability	Chemical Resistance	Electrical Resistivity (Ω·cm)	Dielectric Constant	Volume Resistance (Ω·cm)	Surface Resistance (Ω)	Other Properties														
	Min	Max	Min	Max																											
วัสดุที่ทนความร้อน ชนิด ความร้อน																															
Nylons	-	-	1.5-4	2-3	340-360	-	4-8	-	4.6-7.1	-	1.4-2	0.4-3.3	-	-	-	Yes	0.15-0.40	0.05	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Acetals	-	-	3.1-4.1	2-3	316-338	-	6-20	-	4.6-8	-	1.6-1.9	0.12-0.41	-	-	-	No	0.15-0.35	0.01	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
Acetal, self-lubricating	-	-	-	10	302	-	5-12	-	-	-	-	-	-	-	-	No	0.13	0.03	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
Acetal, TPE-fiber filled	-	-	4.1-4	7.5	329	-	-	-	4.6	-	1.7	0.6	-	-	-	Yes	0.12	0.07	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
Polyethylenes, high-density	-	-	1.3-2.2	-	140-190	-	6	-	6.6-16.7	-	3.4	0.01	-	-	-	No	0.21	0.1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
วัสดุที่ทนความร้อนที่ความถี่สูง เช่น เลเซอร์ วิทยุ ทีวี																															
Nylons	7.1-17.8	0.6-4	1.5-4	-	340-360	140-165	6.0	3	-	-	-	-	-	-	-	E	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Acetals	0.6-10	1.2-1.4	3.7-4.1	-	316-338	230-255	6-20	5	-	-	-	-	-	-	-	E	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Acetal, TPE-fiber filled	6.9	0.06	4.14	-	329	212	-	-	-	-	-	-	-	-	-	E	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Polycarbonates	9-10.5	12-16	3.2-3.4	-	283-293	270-280	7-24	2	-	-	-	-	-	-	-	E	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Phenolics, fabric filled	8-16	1-2.5	6-14	-	320	>320	-	-	-	-	-	-	-	-	-	P to E	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
วัสดุที่ทนอุณหภูมิความถี่สูง																															
TFE & PTFE	1.5-4.5	2.5->16	-	-	250	-	-	-	-	-	-	-	None	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
CTFE	4.6-5.6	3.1-7.3	-	-	245	-	-	-	-	400	-	-	None	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Polypropylenes	3.3-6.7	0.3-1	-	-	710	-	-	-	-	215	-	-	Slow	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Polyphenylene Oxide	11.6	1.3	-	-	355	-	-	-	-	250	-	-	Self ext.	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Epoxy-Glass	34-100	10-25	-	-	350-374	-	-	-	-	230-240	-	-	None	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

ที่มา : 1971 plastics Elastomers Reference Issue, The Penton Publishing Co.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.16 ค่าคงที่ทางกายภาพของวัสดุวิศวกรรมบางชนิด

Aluminum(all alloys)	10.3	71.0	3.80	26.2	0.334	0.098	169	26.6
Beryllium copper	18.0	124.0	7.00	48.3	0.285	0.297	513	80.6
Brass	15.4	106.0	5.82	40.1	0.324	0.309	534	83.8
Carbon steel	30.0	207.0	11.50	79.3	0.292	0.282	487	76.5
Cast iron, gray	14.5	100.0	6.00	41.4	0.211	0.260	450	70.6
Copper	17.2	119.0	6.49	44.7	0.326	0.322	556	87.3
Douglas fir	1.6	11.0	0.60	4.1	0.330	0.016	28	4.3
Glass	6.7	46.2	2.70	18.6	0.245	0.094	162	25.4
Inconel	31.0	214.0	11.00	75.8	0.290	0.307	530	83.3
Lead	6.3	36.5	1.90	13.1	0.425	0.411	710	111.5
Magnesium	6.5	44.8	2.40	16.5	0.360	0.065	112	17.6
Molybdenum	48.0	331.0	17.00	117.0	0.307	0.368	636	100.0
Monel metal	26.0	179.0	9.50	65.5	0.320	0.319	551	86.6
Nickel silver	18.5	127.0	7.00	48.3	0.322	0.316	546	85.8
Nickel steel	30.0	207.0	11.50	79.3	0.291	0.280	484	76.0
Phosphor bronze	16.1	111.0	6.00	41.4	0.349	0.295	510	80.1
Stainless steel (18-8)	27.6	190.0	10.60	73.1	0.305	0.280	484	76.0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง ข. 17

Polymer	Rockwell hardness R scale <sup>a</sup>
<b>Thermoplastic polymers</b>	
<b>General-use polymers</b>	
Polyethylene	
High-density	40
Low-density	10
Polyvinylchloride	110
Polypropylene	90
Polystyrene	75
Polyesters	120
Acrylics (Lucite)	130
Polyamides (nylon 66)	121
Cellulosics	50 to 115
<b>Engineering polymers</b>	
ABS	95
Polycarbonates	118
Acetals	120
Polytetrafluoroethylene (Teflon)	70
<b>Thermosetting Polymers</b>	
Phenolics (phenolformaldhyde)	125
Urea-melamine	115
Polyesters	100
Epoxies	90

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



## เครื่องทดสอบการสึกหรอแบบหมุดกดบนจาน

ภิญโญ จำไวยักษ์<sup>2</sup>, ประเศส โสมาลี<sup>2</sup>

มงคล มงคลวงศ์โรจน์<sup>3</sup>

อาจารย์ที่ปรึกษา

### บทคัดย่อ

การศึกษาถึงคุณสมบัติการสึกหรอของวัสดุทางวิศวกรรมสมัยใหม่กำลังเป็นที่นิยมอย่างสูงและได้พัฒนาอย่างต่อเนื่อง เพื่อให้ได้ประสิทธิภาพที่ดีที่สุด และเหมาะสมต่อสภาพการใช้งานในสภาวะต่างๆของค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน ตลอดจนค่าการสึกหรอ ถือได้ว่าเป็นปัจจัยหลักและเป็นคุณสมบัติพื้นฐานที่สำคัญของการพัฒนา ด้วยเหตุนี้จึงจำเป็นต้องมีการศึกษาถึงความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์ความเสียดทานของการสึกหรอ น้ำหนักที่กดลง 0-2 กิโลกรัม และความเร็วรอบ 300 รอบต่อนาทีภายใต้สภาวะต่างๆ โครงการนี้จึงได้นำเสนอเครื่องทดสอบแบบ Pin-on-Disk ซึ่งเป็นเครื่องทดสอบชนิดหนึ่งที่เป็นที่นิยมอย่างสูงเพื่อใช้ในการทดลอง ศึกษาถึงความสัมพันธ์ของค่าต่างๆข้างต้นที่ได้กล่าวมา โดยการจำลองสภาวะของการทดสอบต่างๆและหากมีการเปลี่ยนแปลงสภาวะการทดสอบก็จะทำให้ความสัมพันธ์บางอย่างเปลี่ยนไป ผลที่ได้จากการทดลองสามารถนำไปประยุกต์ เพื่อพัฒนาอุปกรณ์ชิ้นส่วนเครื่องจักรกล และเป็นประโยชน์ในการตัดสินใจเลือกวัสดุที่เหมาะสมในทางวิศวกรรมมากที่สุด

### Abstract

The study of wear properties of modern machine engineering parts is very popular and it has developed continuously to get the best quality and reliability. Friction and wear are the most important in design and development of machines at high precisional and high operating speed. In this study, the pin-on-disk wear test machine is under design and development in order to be able to measure both friction and wear conditions at varying load; 0-2 kg and speed; 300 rpm for the test machine respectively. The test will be beneficial to the design and development of machine engineering parts for selecting the used an appropriate material for most engineering. In this project, the test specimen is polyethylene. The test was at 1 and 2kg loads with varying speed to obtain the wear characteristics of the polyethylene specimen.

© 2006 Department of Mechanical Engineering, KMITL. All rights reserve

**Keywords:** Pin-on-disk wear test machine, strain gage, specimen test, polyethylene specimen

### 1. บทนำ

ปัจจุบันวัสดุวิศวกรรมสมัยใหม่ถูกวิจัยและพัฒนา คุณสมบัติให้มีขีดความสามารถสูงในหลายๆด้าน เพื่อตอบสนองความต้องการในงานแต่ละด้านของอุตสาหกรรม คุณสมบัติบางประการที่น่าสนใจมากและมีผลต่ออายุการใช้งานของเครื่องจักรคือการสึกหรอของวัสดุ การศึกษาถึงความสัมพันธ์ของคุณสมบัติ ด้านความเสียดทานของวัสดุ อันเป็นสาเหตุหลักของการสึกหรอ ตลอดจนผลการที่วัสดุได้รับที่สภาวะต่างๆ โดยหัวข้อที่จะศึกษามีดังนี้

- 1.อายุการใช้งานของพลาสติก
- 2.การสึกหรอของพลาสติก
- 3.สาเหตุของการสึกหรอ
- 4.คุณสมบัติอื่นๆ

<sup>1</sup> ชื่ออังกฤษ “PIN-ON-DISK WEAR TESTER”

<sup>2</sup> นักศึกษานาควิศวกรรมเครื่องกล สจล. ห้อง 3Q/1,3Q/2 รหัส 47015721, 47015339 ตามลำดับ

<sup>3</sup> อาจารย์ประจำภาควิศวกรรมเครื่องกล สจล., โทร. 0 2326 4197, อีเมล [kssayam@kmitl.ac.th](mailto:kssayam@kmitl.ac.th)

## 2.วัตถุประสงค์ของโครงการงาน

- 1 เพื่อคำนวณออกแบบและสร้างอุปกรณ์เครื่องทดสอบวัสดุชนิดต่างๆแล้วนำค่าที่ได้ มาวัดผลของการสึกหรอของวัสดุ
- 2 เพื่อศึกษาถึงความสำคัญและความเป็นไปได้ของวัสดุ รวมทั้งการนำไปใช้ประโยชน์ต่างๆ
- 3 เพื่อเป็นเครื่องทดสอบใช้ในห้องปฏิบัติการ (Lab)
- 4 เพื่อศึกษาหน้าสัมผัสผิวที่เกี่ยวกับความเสียดทานและปัจจัยอื่นๆ

## 3.ขอบเขตของโครงการงาน

- 3.1 ออกแบบเครื่องทดสอบ
- 3.2 สร้างเครื่องทดสอบการสึกหรอของพลาสติกแบบ Pin-On-Disk
- 3.3 สามารถทดสอบการสึกหรอของพลาสติกขั้นพื้นฐานได้

## 4.หลักการทํางานของเครื่องทดสอบการสึกหรอวัสดุแบบหมุนกดบนจาน

เมื่อนำพลาสติกตัวอย่างชนิด Polyethylene (PE) วางบนจานหมุนจากนั้นนำแท่งพลาสติกทดสอบชนิด Polypropylene (PP) วางในตำแหน่งที่จะทำการทดสอบ พร้อมกับใส่น้ำหนักกดบนแกนกด เปิดสวิตช์เครื่องทดสอบ เมื่อเครื่องทํางานแล้วทำการปรับตำแหน่งหัวกดให้กดลงบนแผ่นตัวอย่าง จากนั้นตรวจสอบผลการทดลองโดยการชั่งน้ำหนักของแท่งทดสอบเพื่อหาการสึกหรอต่อไป

## 5.การออกแบบเครื่องทดสอบ

การออกแบบอุปกรณ์และสร้างชิ้นส่วนในการทดสอบมีดังนี้

### 5.1 มอเตอร์

เลือกมอเตอร์ขนาด 300 W แรงเคลื่อนไฟฟ้าที่ 12 V มอเตอร์กระแสตรง เป็นตัวส่งกำลังในการขับเคลื่อนชุดจานทดสอบ ซึ่งชุดทดสอบใช้ความเร็วรอบที่ 100,200,300 รอบต่อนาที น้ำหนักที่ใช้ทดสอบสูงสุด 2.0 กิโลกรัม โดยค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของพอลิโพรไพลีน ( $\mu$ ) เท่ากับ 0.3 รัศมีการกดสูงสุด 40 มิลลิเมตร แรงบิดหาได้จาก

$$T = r \times F$$

เมื่อ

$$F = \mu_k N$$

### 5.2 หัวกด (Pin)

การออกแบบหัวกดสามารถคำนวณหาพื้นที่หัวกดได้จากสมการ

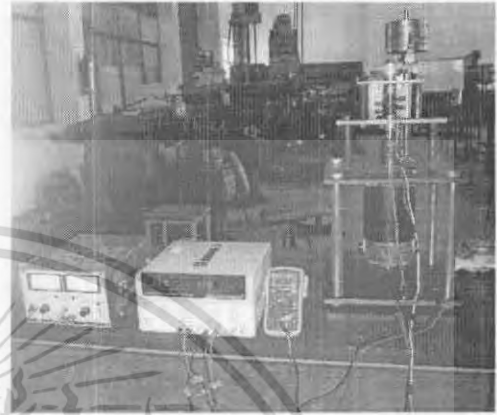
$$\tau_{max} = \frac{V}{A}$$

### 5.3 คัปปลิง

เนื่องจากคัปปลิงเป็นตัวส่งผ่านกำลังจากมอเตอร์ไปยังเพลลา ซึ่งออกแบบเลือกใช้งานโดยมีข้อสองด้านและยางยึดหมุนหนึ่งชิ้น ทำให้แรงบิดในมอเตอร์เริ่มต้นหมุนอย่างนิ่มนวล อีกทั้งยังสะดวกต่อการตั้งศูนย์และสามารถถอดประกอบได้ง่ายเลือกใช้ SJ Coupling

## 5.4 พลาสติกที่นำมาทดสอบ

เป็นพอลิเอทิลีน (Polyethylene) และพอลิโพรไพลีน (Polypropylene) เป็นพอลิเมอร์ที่มีโครงสร้างพื้นฐานง่ายที่สุดน้ำหนักโมเลกุลต่ำ ซึ่งมีลักษณะเป็นไข

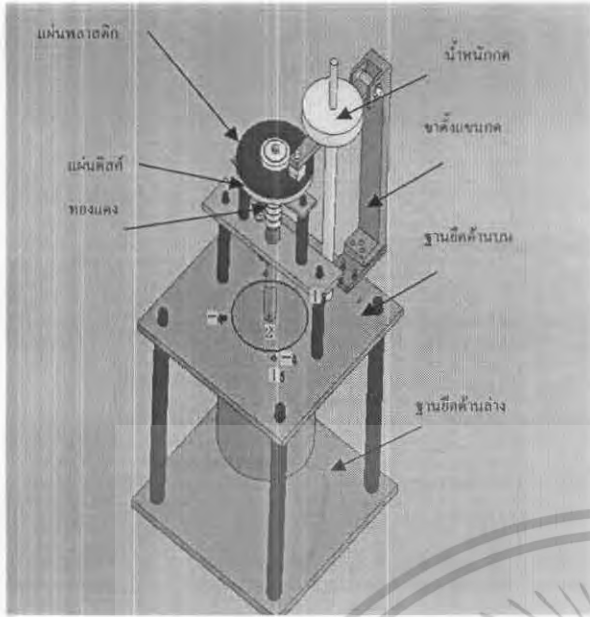


รูป 5.1 โครงสร้างจริงของเครื่องทดสอบ



รูป 5.2 ชุดจานและตัวอย่างพลาสติก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.3 โครงสร้างทั้งหมด

**6.ขั้นตอนการทดลอง**

**6.1 วิธีการทดลองที่ 1**

- 6.1.1 หัววัดเป็นแบบ PP และแผ่นดิสก์เป็น PE
- 6.1.2 ประกอบชุดอุปกรณ์การทดลองโดยที่ยังไม่ใส่น้ำหนักกด
- 6.1.3 เปิดสวิตซ์ ON ที่แหล่งจ่ายปรับให้มอเตอร์ทำงาน โดยการปรับแรงดันโวลต์
- 6.1.4 ใส่น้ำหนักกดลงบนแขนกด จากนั้นใส่น้ำหนักกดตาม
- 6.1.5 ปรับตัวปรับตำแหน่งแขนกดให้กดลงไม่ซ้ำๆ
- 6.1.6 ใช้เครื่องมือวัดรอบ วัดความเร็วรอบให้ได้ตามที่กำหนด
- 6.1.7 จับเวลาให้ได้ตามรอบของการทดลองที่กำหนดไว้
- 6.1.8 เมื่อได้จำนวนรอบของการทดลองแล้วปรับตำแหน่งตัว

ปรับตำแหน่งให้แขนกดยกก่อนน้ำหนักขึ้น

- 6.1.9 ปิดสวิตซ์แหล่งจ่าย
- 6.1.10 เอาหัววัดออกจากชุดทดลองแล้วนำไปชั่งน้ำหนักที่เสียไป และบันทึกค่าต่างๆไว้
- 6.1.11 ทำการทดลองเหมือนเดิมแต่เปลี่ยนจำนวนรอบตามที่กำหนด
- 6.1.12 เปลี่ยนน้ำหนักกดใหม่และทดลองตามความเร็วรอบที่กำหนดไว้
- 6.1.13 นำผลการทดลองที่ได้มาพล็อตกราฟเปรียบเทียบการลิก

หรือ

**6.2 วิธีการทดลองที่ 2**

- 6.2.1 ใช้หัววัดเป็นแบบ PP และใช้จานหมุนเป็นเหล็ก
- 6.2.2 วิธีการทดลองเป็นเช่นเดียวกับวิธีการทดลองที่ 1

**6.2.3 นำผลการทดลองที่ได้มาพล็อตกราฟเปรียบเทียบการลิก**

หรือ

**6.3 วิธีการทดลองที่ 3**

- 6.3.1 ใช้หัววัดเป็นชนิด PP และใช้จานกดเป็นชนิด PE
- 6.3.2 ทำการทดลองเช่นเดียวกับการทดลองที่ 1 และทดลองที่ 2 แต่ปรับค่าความเร็วรอบของมอเตอร์ให้ได้ตามที่ต้องการ
- 6.3.3 หลังจากนั้นเมื่อได้ค่าต่างๆครบแล้วนำค่าต่างๆพล็อตกราฟเปรียบเทียบค่าการลิกหรือระหว่างจำนวนรอบกับน้ำหนักที่ลิกหรือของหัววัด

**6.4 วิธีการทดลองที่ 4**

- 6.4.1 ใช้หัววัดเป็นแบบ PP และใช้จานหมุนเป็นเหล็ก
- 6.4.2 วิธีการทดลองเป็นเช่นเดียวกับวิธีการทดลองที่ 1
- 6.4.3 นำผลการทดลองที่ได้มาพล็อตกราฟเปรียบเทียบการลิก

หรือ

**6.5 วิธีการทดลองที่ 5**

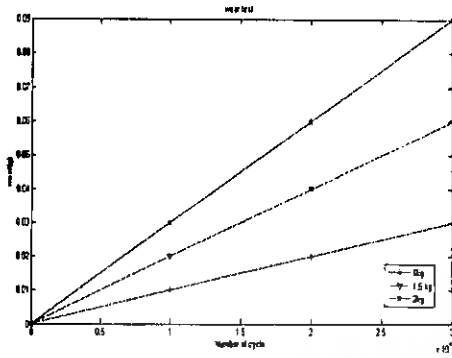
- 6.5.1 ใช้หัววัดเป็น PP จานหมุนเป็น PE
- 6.5.2 วิธีการทดลองเป็นเช่นเดียวกับวิธีการทดลองที่ผ่านมา
- 6.5.3 แต่ปรับ Pin ให้ได้ตามรัศมีต่างๆ
- 6.5.4 บันทึกผลการทดลอง

**6.6 วิธีการทดลองที่ 6**

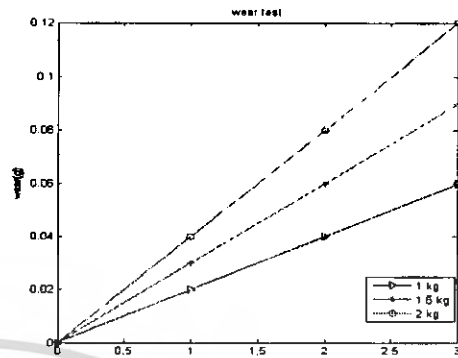
- 6.6.1 ทำเหมือนกับวิธีการทดลองที่ 5
- 6.6.2 ใช้หัววัดเป็น PP จานหมุนเป็นเหล็ก
- 6.6.3 แต่ปรับ Pin ให้ได้ตามรัศมีตามที่กำหนด
- 6.6.4 บันทึกผลการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

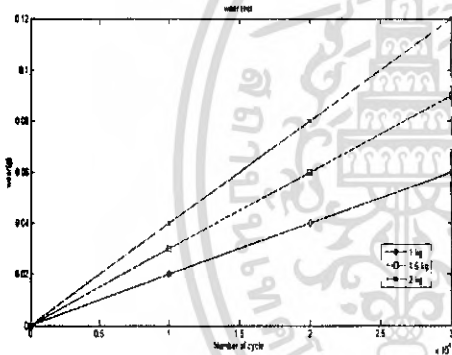
กราฟที่ 1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการสึกหรอกับจำนวนรอบ (หัวกดแบบ Polypropylene และจานหมุนแบบ Polyethylene)



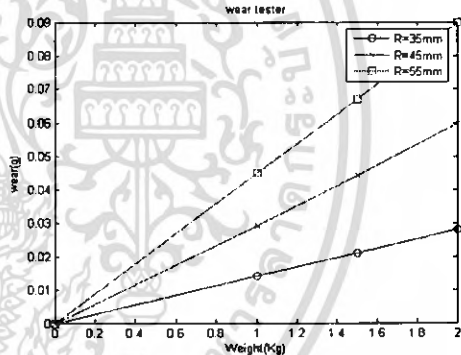
กราฟที่ 4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการสึกหรอกับความเร็วนรอบ (หัวกดแบบ Polypropylene และจานหมุนแบบเหล็ก)



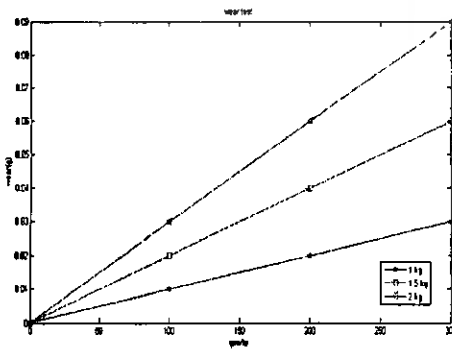
กราฟที่ 2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการสึกหรอกับจำนวนรอบ (หัวกดแบบ Polypropylene และจานหมุนแบบเหล็ก)



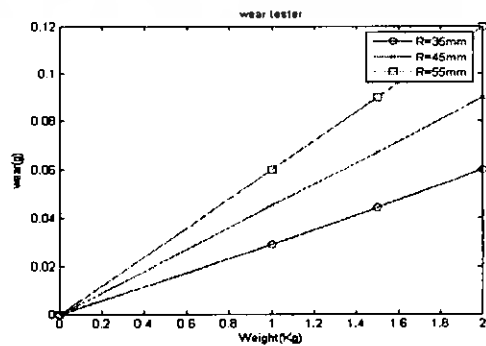
กราฟที่ 5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างรัศมีของกราด 35,45,55 mm น้ำหนักกด 1,1.5,2 Kg ใช้ความเร็วรอบในการทดสอบ 300 รอบ/นาที (หัวกดเป็น Polypropylene และจานหมุนเป็น Polyethylene)



กราฟที่ 3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการสึกหรอกับความเร็วนรอบ (หัวกดแบบ Polypropylene และจานหมุนแบบ Polyethylene)



กราฟที่ 6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างรัศมีของกราด 35,45,55 mm น้ำหนักกด 1,1.5,2 Kg ความเร็วรอบในการทดสอบที่ 300 รอบ/ นาที (หัวกดเป็น Polypropylene และจานหมุนเป็นเหล็ก)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**7.สรุปผลการทดลอง**

7.1 จากกราฟผลการทดลองที่ 1 ใช้หัวกดเป็นชนิด PP ใช้จานหมุนเป็นชนิด PEจากการทดลองที่ 1 ให้จานหมุน หมุนด้วยความเร็วคงที่ แต่ปรับจำนวนรอบของการทดลองตามที่ได้กำหนดไว้รวมทั้งปรับภาระบนหัวกดตามที่กำหนดไว้เช่นกัน จากกราฟจะเห็นว่าค่าของการสึกหรอจะเพิ่มขึ้นเป็นลักษณะเชิงเส้นตามจำนวนรอบที่เพิ่มขึ้น และเมื่อเราเพิ่มภาระมากขึ้นการสึกหรอก็จะเพิ่มขึ้นตามไปด้วยแสดงให้เห็นว่าการสึกหรอของพลาสติก ขึ้นอยู่กับปริมาณของภาระที่มากกระทำและระยะเวลาในการใช้งาน ทั้งนี้การสึกหรอที่เกิดขึ้นจะเกิดจากการสัมผัสกันโดยตรงของหน้าสัมผัสของวัสดุทดสอบทำให้เกิดแรงเสียดทานด้านการเคลื่อนที่ทางด้านจานหมุน และจากการทดลองดังกล่าวเมื่อวัสดุเสียดสีกันโดยตรงโดยไม่มีการหล่อลื่น (dry friction) จะทำให้ชั้นทดสอบเกิดการสึกหรอขึ้น

7.2 จากกราฟผลการทดลองที่ 2 ใช้หัวกดเป็นชนิดPPใช้จานหมุนเป็นเหล็กจากกราฟผลการทดลองดังกล่าวจะเห็นว่าเกิดการสึกหรอของวัสดุชนิด PP มากเมื่อเทียบกับกรทดลองที่ 1 ทั้งนี้เป็นเพราะว่าเมื่อเกิดการเสียดทานแห้งระหว่างวัสดุที่เป็นโลหะกับพลาสติก จะทำให้พลาสติกสึกหรอเร็วขึ้น เป็นเพราะผิวสัมผัสของเหล็กจะมีความหยาบของผิวและมีความแข็งของผิวมากกว่าพลาสติกจึงทำให้พลาสติกสึกหรอมากขึ้น

7.3 จากกราฟผลการทดลองที่ 3,4 เมื่อเราเปลี่ยนมาใช้ความเร็วรอบต่างๆ โดยใช้เวลาในการทดลองเท่ากัน จะทำให้เกิดการสึกหรอใกล้เคียงกับการทดลองที่ 1,2

ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าเมื่อมีการเสียดสีระหว่างวัสดุที่มีคุณสมบัติใกล้เคียงกัน และวัสดุที่มีคุณสมบัติแตกต่างกัน วัสดุที่มีคุณสมบัติแตกต่างกันมากจะทำให้การสึกหรอเกิดขึ้นรวดเร็วกว่าวัสดุที่มีคุณสมบัติใกล้เคียงกันเป็นเพราะว่าพลาสติกที่ใช้ทดสอบมีความอ่อนนุ่มของผิวมากกว่า จึงสูญเสียเนื้อหลักให้กับเหล็กจำนวนมาก ทำให้เกิดการสึกหรออย่างรวดเร็ว ตัวแปรที่สำคัญอีกตัวคือความร้อน เมื่อเกิดการเสียดสีแห้งจะทำให้ความร้อนเพิ่มขึ้น ทำให้พลาสติกเกิดการเสียรูปอย่างถาวรและสึกหรอเพิ่มขึ้น เพราะฉะนั้นวิธีการที่จะสามารถลดการสึกหรอของชิ้นส่วนหรืออุปกรณ์ได้นั้นกระทำได้โดยการหล่อลื่นวัสดุเพื่อลดแรงเสียดทานและระบายความร้อนให้กับชิ้นส่วน รวมทั้งการเลือกใช้วัสดุให้เหมาะสม จะทำให้อายุการใช้งานของวัสดุยาวนานขึ้น

เมื่อเปรียบเทียบผลที่ได้จากทางทฤษฎี กับผลการทดลองจริงพบว่าความชันของกราฟจะมีลักษณะเหมือนกัน ซึ่งให้ผลของการสึกหรอเป็นเชิงเส้นเหมือนกัน

**7.4 วิจัยรณผลการทดลองและวิเคราะห์ปัญหาผลการทดลอง**

**7.4.1 ปัญหาของโครงสร้างอุปกรณ์**

- เครื่องมือที่ใช้ในการสร้างอุปกรณ์การทดลองไม่อยู่ในสภาพที่ใช้ งานได้ดี ทำให้อุปกรณ์ที่สร้างขึ้นมีความผิดพลาดสูงจึงเป็นไปได้ยากที่จะสร้างอุปกรณ์ให้ได้ตามที่ออกแบบไว้ ทำให้เสียเวลาในการสร้างอุปกรณ์มาก

- ขนาดที่ออกแบบไว้ไม่เหมาะสมสำหรับการทดลอง เช่นขนาดของเพลลาที่จะทำการวัดแรงบิดมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางโตเกินไป ทำให้ไม่สามารถวัดค่าแรงบิดได้

- มีข้อจำกัดของการปฏิบัติงานและการเลือกวัสดุที่เหมาะสมเช่น

- เหล็กเหนียว ในการขึ้นรูปเพลลาอาจจะทำให้เพลลาคดได้และจะส่งผลไปยังจานหมุนทำให้การหมุนไม่สมดุล

- เหล็กแข็ง ขึ้นรูปยากตอนขึ้นรูปจะต้องหล่อเย็นตลอดเวลา และความยืดหยุ่นต่ำเป็นสาเหตุให้ที่แรงบิดต่ำไม่สามารถที่จะวัดค่าของแรงบิดได้

- อลูมิเนียม ขึ้นรูปง่ายแต่จะต้องมีขนาดที่โตขึ้น สามารถอ่านค่าแรงบิดที่แรงบิดต่ำได้ แต่วัสดุที่ใช้ทำมีราคาค่อนข้างแพง

- ความยาวของเพลลาในส่วนที่วัดแรงบิด มีระยะหรือความ ยาวน้อยเกินไปทำให้ติดตั้งอุปกรณ์ในการวัดและอุปกรณ์อื่นลำบาก

**7.5 ปัญหาของมอเตอร์ส่งกำลัง ( ดีซี 12 โวลต์)**

7.5.1 มอเตอร์ที่ใช้ในการทดลอง ให้แรงบิดต่ำมากเมื่อเราใส่ภาระ มากๆ มอเตอร์จะไม่ทำงานหรือหมุนได้น้อยทำให้ไม่สามารถวัดค่าได้

7.5.2 ถ้าต้องการให้ได้แรงบิดมากๆ จะต้องเพิ่มแรงดัน(โวลต์) ให้กับมอเตอร์เพิ่มมากขึ้น ซึ่งในทางปฏิบัติแล้วเป็นไปได้ยากเพราะ มอเตอร์เป็นแบบ กระแสตรง ดีซี 12 โวลต์ ถ้าเราปรับเพิ่มมากขึ้นไป อาจจะทำให้ตัวมอเตอร์เสียหายได้ และความเร็วรอบที่ได้ก็จะเพิ่มมากขึ้นซึ่งไม่ใช่สิ่งที่เราต้องการ

7.5.3 อีกกรณีของการเพิ่มแรงบิดให้สูงขึ้นโดยการเพิ่มกระแส โดยการปรับกระแสจากแหล่งจ่าย(supply) แต่มีข้อจำกัดที่ว่าแหล่งจ่ายที่ใช้ ไม่สามารถปรับค่ากระแสตามที่ต้องการได้

**7.6 ปัญหาของเครื่องมือวัด**

7.6.1 เครื่องมือวัดรอบ การวัดรอบการหมุนของอุปกรณ์ ไม่ สามารถวัดค่าที่แน่นอนได้จึงทำให้ค่าที่อ่านได้มีความผิดพลาดสูง เมื่อ ลองใช้เครื่องมือวัดรอบสองตัวในการวัดเปรียบเทียบกันค่าที่อ่านได้ไม่ เท่ากันแสดงว่าความผิดพลาดของเครื่องมือวัดสูงมาก

7.6.2 เครื่องมือวัดแรงบิด (Torque cell) เมื่ออุปกรณ์ในการ ทดลองให้แรงบิดต่ำไม่สามารถที่จะวัดค่าของแรงบิดได้ อีกสาเหตุหนึ่ง เกิดมาจากการออกแบบเพลลา ซึ่งมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางโตเกินไป เพลลาไม่เกิดการบิดตัว ทำให้เครื่องมือวัดไม่สามารถอ่านค่าออกมาได้

**9.ข้อเสนอแนะ**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

9.1 ควรใช้เครื่องมือที่มีคุณภาพในการขึ้นรูปอุปกรณ์ หรือใช้เครื่องมือที่มีมาตรฐานมากขึ้น

9.2 เลือกใช้วัสดุที่ค่อนข้างเหนียวและมีจุดครากต่ำเพื่อที่จะทำให้สามารถวัดค่าแรงบิดได้

9.3 การออกแบบส่วนของเพลลาที่ต้องการวัดค่าแรงบิดจะต้องเล็กลง แต่ต้องคำนึงถึงภาระที่เหมาะสม

9.4 ขนาดของเพลลาส่วนที่จะติดตั้งอุปกรณ์วัดแรงบิดควรที่จะเพิ่มขนาดของความยาวให้มากขึ้น เพื่อต่อการติดตั้งเครื่องมือวัด

9.5 ควรเลือกมอเตอร์ส่งกำลังที่ให้แรงบิดสูง

9.6 ในการเพิ่มแรงบิดของมอเตอร์จะต้องจ่ายกระแสให้กับมอเตอร์มากขึ้นเพราะฉะนั้นในการเลือกแหล่งจ่าย ควรจะเลือกแหล่งจ่ายที่สามารถปรับค่าของกระแสได้

#### 10.บรรณานุกรม

- [1] สมนึก บุญพาไสว,การวัดและเครื่องมือวัด(Measurement and Instrumentation),บริษัทสำนักพิมพ์ท็อป จำกัด
- [2] กฤษดา บู่แก้ว,ศิริพงศ์ พันธุ์เพ็ง,ศุภชัย บู่คำ, “เครื่องทดสอบการสึกหรอวัสดุแบบพินออนดิस्क”ปริญญาานิพนธ์ สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ปีการศึกษา2544
- [3] รศ.บรรเลง ครนนิล,“เทคโนโลยีพลาสติก”,สำนักพิมพ์ ส.ส.ท. (สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี) ไทย-ญี่ปุ่น พิมพ์ครั้งที่ 17
- [4] ผศ.ดร.เจริญ นาคะสรรค์, “เทคโนโลยีเบื้องต้นทางพลาสติก”ภาคเทคโนโลยียางและพอลิเมอร์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตปัตตานี, พิมพ์ครั้งที่ 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้