

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การวิจัยครั้งนี้เป็นการทดลองวัสดุหล่อลื่นด้วยตัวเอง โดยการใช้ทัลคัมเติมลงในบรอนซ์ดีบุก แล้วนำไปทดสอบสมบัติทางกล คือ ทดสอบความแข็ง การสึกหรอ ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานและความต้านแรงดึง ซึ่งมีทฤษฎีต่างๆที่เกี่ยวข้องที่ควรทราบดังนี้

2.1 วิธีการเตรียมวัสดุหล่อลื่นด้วยตนเอง (Self-Lubricating Material)

วิธีการเตรียมวัสดุหล่อลื่นด้วยตนเอง (Self-Lubricating Material) ในปัจจุบันจะนิยมใช้วิธีการทางโลหกรรมผง (Powder Metallurgy) คือจะทำให้อยู่ในลักษณะของอนุภาคผงโดยมีการผสมส่วนผสมต่างๆเข้าด้วยกัน เช่น ใช้วิธีการบดผสมจากการเตรียมโดยวิธีโลหะผสมเชิงกล แล้วจึงนำไปผ่านกระบวนการอัดขึ้นรูปโดยใช้อุณหภูมิ ความดันและเวลาที่เหมาะสม จะได้ชิ้นงานที่มีความแข็งค่าหนึ่งแต่ยังไม่สามารถนำไปใช้งานได้เรียกว่า Green Part หลังจากนั้นจะนำไปผ่านกระบวนการอบผนึก (Sintering) ภายใต้บรรยากาศและอุณหภูมิที่กำหนดไว้ เพื่อให้ชิ้นงานมีความแข็งแรงพร้อมใช้งาน

2.2 ทฤษฎีพื้นฐานของแรงเสียดทานแบบของแข็ง (Jorn Larsen-Basse, 1994)

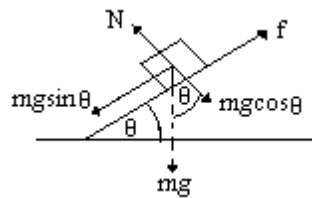
แรงเสียดทานคือแรงในแนวเส้นสัมผัสสวางกลม จะต้องมากพอเพื่อที่จะสามารถทำให้หน้าสัมผัสเคลื่อนที่ไถลไปบนอีกหน้าสัมผัสหนึ่งได้ ซึ่งจะแสดงบนระนาบของผิวและสัดส่วนที่พอเหมาะของแรง โดยปกติแรงเสียดทานที่ผิวคือ

$$F = \mu N \quad \dots\dots\dots (1)$$

เมื่อ μ คือค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน, F คือ แรงเสียดทานที่กระทำบนวัตถุและ N คือแรงปฏิกิริยาที่ผิวกระทำต่อวัตถุที่เคลื่อนที่ผ่านหรือกำลังจะเคลื่อนที่

ในหลายๆกรณี แรงเสียดทานที่ต้องการให้ชิ้นงานอยู่กับที่จะมีค่ามากกว่าแรงเสียดทานขณะเคลื่อนที่ ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานเริ่มต้น (μ_s) จึงมีค่ามากกว่า ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานจลน์ (μ_k) ชิ้นงานที่อยู่บนพื้นผิวเรียบสามารถเคลื่อนที่ได้ตามแรงโน้มถ่วง ถ้าพื้นผิวถูกยกให้เท่ากับมุมของแรงเสียดทาน ตามสมการที่ 2

ถ้าวัตถุอยู่บนพื้นเอียงแล้ววัตถุเริ่มไถลลงมาตามพื้นเอียงด้วยความเร็วคงที่ มุมที่พื้นระนาบเอียงกระทำกับแนวระดับ คือ มุมของความเสียดทาน (θ)



$$f = mg \sin \theta$$

$$N = mg \cos \theta$$

$$\frac{f}{N} = \frac{mg \sin \theta}{mg \cos \theta}$$

$$\mu = \frac{f}{N} = \tan \theta$$

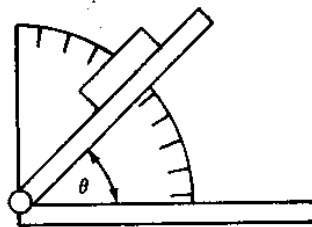
$$\mu_s = \tan \theta \quad \dots \dots \dots (2)$$

คำว่าแรงเสียดทาน (Friction) ถูกใช้เพื่อบรรยายการสูญเสียที่ค่อยๆเกิดขึ้นของพลังงานจลน์ในหลายๆสถานการณ์ ที่เกิดขึ้นบริเวณผิวชิ้นงานที่เกิดการเคลื่อนที่สัมผัสซึ่งกันและกัน ตัวอย่างเช่น แรงเสียดทานภายใน (Internal Friction) ซึ่งเกิดจากการสั่นของของแข็ง แรงเสียดทานหนืด (Viscous Friction) เกิดจากการเคลื่อนที่อย่างช้าๆของของเหลว แรงเสียดทานผิว (Skin Friction) เกิดระหว่างการเคลื่อนที่ของเครื่องบินกับอากาศบริเวณรอบๆ และแรงเสียดทานของแข็ง (Solid Friction) คือแรงเสียดทานระหว่างของแข็งสองส่วนเคลื่อนที่สัมผัสซึ่งกันและกัน การเคลื่อนที่อาจเป็นแบบไถล

หรืออีกจะถูกเรียกว่า แรงเสียดทานแบบไถล (Sliding Friction) และ แรงเสียดทานแบบกลิ้ง (Rolling Friction) ตามลำดับ

ความต้องการเพื่อที่จะควบคุมแรงเสียดทานนั้น ทำให้เกิดการศึกษารึ้นในหลายๆกรณี ซึ่งในบางกรณีต้องการแรงเสียดทานต่ำ เช่น Bearing, Gears และวัสดุที่ใช้ในการผ่าตัด เป็นต้น บางครั้งต้องการแรงเสียดทานสูง เช่น Brakes, Clutches, Screw Threads และพื้นผิวถนน เป็นต้น ในทุกๆกรณีล้วนมีความสำคัญต่อการกำหนดส่วนผสมต่างๆเข้าไปในชิ้นงานเพื่อให้มีประสิทธิภาพสูงสุดตามต้องการ

การวัดค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานสถิต (Jorn Larsen-Basse, 1994 and Budinski, 1994) จะกระทำบนพื้นเอียงดังรูปที่ 2.1 จะต้องการแค่เพียงทำการวัดมุมซึ่งส่งผลให้ชิ้นงานเริ่มมีการเคลื่อนที่ วิธีนี้เป็นวิธีซึ่งได้รับความนิยมมากที่สุดในการวัดค่ามุมเอียงของแรงเสียดทาน โดยจะมีโปรเทคเตอร์เป็นอุปกรณ์ในการอ่านค่ามุมเอียง หลังจากนั้นจะนำค่าจากการอ่านที่ได้ไปคำนวณโดยใช้สมการที่ 2 ก็จะได้เป็นค่าสัมประสิทธิ์ของแรงเสียดทานสถิต ซึ่งขึ้นกับว่าจะใช้คู่กับวัสดุชนิดใดในการหาค่ามุมเอียงก็จะได้เป็นค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานสถิตระหว่างคู่วัสดุนั้นๆ



รูปที่ 2.1 แสดงการวัดมุมเอียงของแรงเสียดทานสถิต

2.3 มาตรฐานการทดสอบการหาค่าแรงเสียดทาน

มีสถาบันอยู่มากมายที่มีการพัฒนาการหาค่าแรงเสียดทาน ในที่นี้จะขอใช้ข้อมูลจากสถาบัน ASTM ซึ่งได้ระบุวิธีการทดสอบการหาค่าแรงเสียดทานของวัสดุต่างๆไว้อย่างมากมายตามตารางที่ 2 สำหรับการวิจัยในครั้งนี้จะเลือกใช้วิธี ตามมาตรฐาน D 3248 มาประยุกต์ใช้ เพื่อทำการวัดมุมเอียงระหว่างวัสดุสองชนิดที่มีผิวเรียบและเป็นของแข็งในสถานะที่แห้ง ผลที่ได้จะเป็นไปตามสมการที่ 2

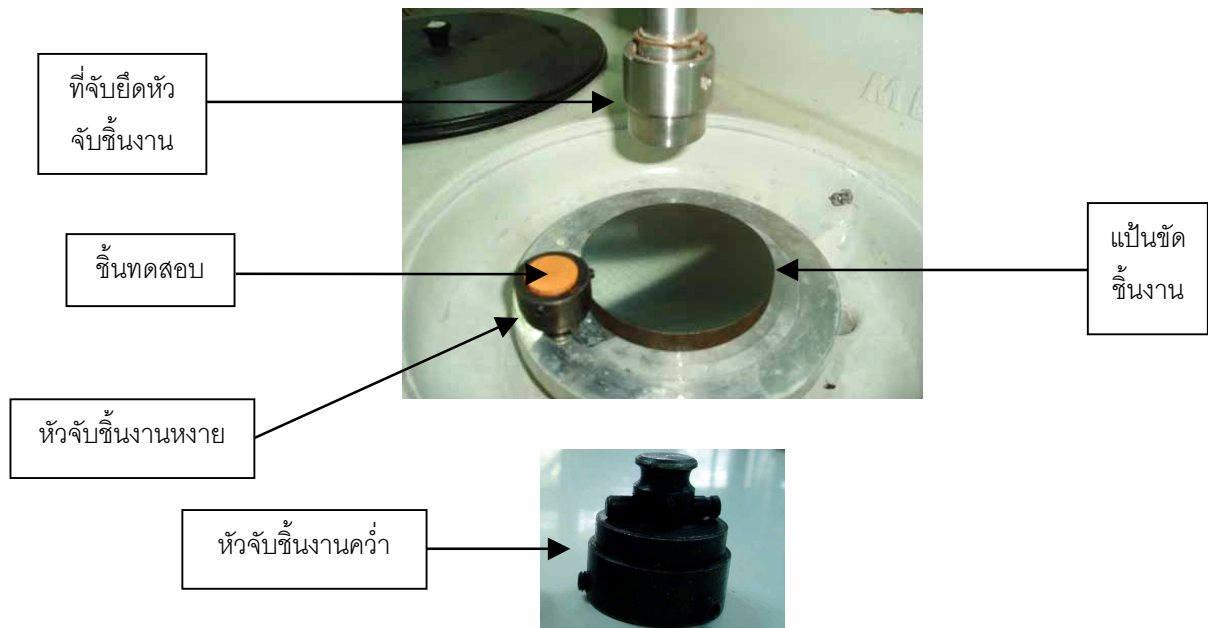
ตารางที่ 2.1 ตารางมาตรฐานในการทดสอบหาค่าแรงเสียดทานจากสถาบัน (ASM, 1994)

รหัสมาตรฐาน	หัวข้อในการทดสอบ	ชนิดของวัสดุเปรียบเทียบ
B 460	สัมประสิทธิ์จลน์และการสึกหรอของวัสดุภายใต้ สภาวะที่แห้ง	โลหะ
B 461	ลักษณะของแรงเสียดทานภายใต้การหล่อลื่น	โลหะ
B526	สัมประสิทธิ์แรงเสียดทานและการสึกหรอ	เหล็กหล่อสีเทา
C 808	แรงเสียดทานและการสึกหรอของคาร์บอน	วัสดุอื่นๆ
D 1894	สัมประสิทธิ์สถิตและจลน์ของแผ่นฟิล์ม	วัสดุแข็งเรียบ
D2047	สัมประสิทธิ์สถิตของผิวขัด โดย เจมส์	พื้นและส้นรองเท้า
D 2394	ทดสอบพื้นไม้	หนัง
D 2714	โมเดลการหาแรงเสียดทาน LFW-1	วงแหวนโลหะกับโลหะ
D 3028	สัมประสิทธิ์จลน์ของพลาสติกและแผ่นแข็ง	ของแข็งอื่นๆ
D 3108	สัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของเส้นด้าย	ของแข็ง
D 3247	สัมประสิทธิ์สถิตของกระดานแข็ง	วัสดุชนิดเดียวกัน
D 3248	สัมประสิทธิ์สถิตของกระดานแข็งที่ยกทำมุมเอียง	วัสดุชนิดเดียวกัน
D 3334	ทดสอบสิ่งทอจากพอลิโอสีฟีน	วัสดุชนิดเดียวกัน
D 3412	สัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของเส้นด้าย	เส้นใย
D 4103	กาทดสอบหาสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของแผ่นผิว เรียบ	ไม้และไวเนล
E 303	การวัดแรงเสียดทานที่ผิวโดยใช้ British Pendulum	ยางกับพื้นราบ
E 510	การวัดแรงเสียดทานโดยใช้ Small Torque	ยางกับพื้นราบ
E 670	การวัดแรงเสียดทานโดยใช้ Mu-Meter	ยางกับพื้นราบ
E 707	การวัดแรงเสียดทานโดยใช้ Variable Friction	ล้อยางกับพื้นราบ
F 489	อัตราของสัมประสิทธิ์สถิตโดย Jame Machine	พื้น ส้นรองเท้าและหนัง
F 609	สำหรับรองเท้า พื้นและส้นรองเท้า โดย Horizontal Pull Slipmeter (HPS)	พื้นผิวที่ใช้เดิน
F 695-81	ประยุกต์โดยใช้ทั้ง HPS กับ Jame Machine	พื้นผิวที่ใช้เดิน
F 732	Pin-on-Flat สำหรับ พอลิเมอร์ที่ทำข้อต่อ	วัสดุที่ใช้ทำข้อต่อ

2.4 วิธีการทดสอบหาค่าอัตราการสึกหรอ

การทดสอบหาค่าอัตราการสึกหรอนั้นจะทำการประยุกต์จากเครื่องขัดชิ้นงานเพื่อเตรียมคูโครงสร้าง ยี่ห้อ (METKON) ดังรูปที่ 2.2 โดยเครื่องสามารถกำหนดค่าต่างๆได้ เช่น แรงในการกด เวลา ความเร็วรอบในการหมุนและทิศทางในการหมุนของแป้นขัด เป็นต้น ซึ่งในการหาค่าอัตราการสึกหรอนั้นจะคิดคำนวณโดยการหาค่าน้ำหนักที่สูญหายหลังจากการขัดเทียบกับเวลา คือจะชั่งน้ำหนักชิ้นงานก่อนและหลังขัดอีกทั้งจะกำหนดเวลา แรงกด ความเร็วรอบและทิศทางที่ใช้ในการขัดให้เท่ากันทุกๆชิ้น เพื่อจะได้ทราบว่าชิ้นงานที่มีตัวแปรแตกต่างกันนั้น มีค่าอัตราการสึกหรอแตกต่างกันเพียงไรในสภาวะที่แห่งตลอดการวิจัย

โดยทำการคำนวณหาน้ำหนักที่สูญหายหลังจากการขัดเทียบกับเวลา ถ้าชิ้นงานมีการหล่อลื่นที่ดีก็จะมีค่าของน้ำหนักที่สูญหายไปเป็นปริมาณที่น้อยและจะนำชิ้นงานไปถ่ายภาพเปรียบเทียบกับลักษณะของผิวหลังการขัดเพื่อศึกษาถึงลักษณะของผิวชิ้นงานที่เกิดการเสียหายเนื่องมาจากการขัด วิธีการนี้ได้ทำการประยุกต์มาจากการศึกษาของ Hirotaka Kato



รูปที่ 2.2 ภาพแสดงลักษณะของหัวจับชิ้นงานและแป้นขัดชิ้นงานของเครื่องขัด Metkon ที่ใช้ในการหาค่าอัตราการสึกหรอ

2.5 แรงเสียดทานและการสึกหรอของวัสดุผสมโลหะ

ในอดีตที่ผ่านมาแล้วมีการวิจัยและพัฒนาเกี่ยวกับแรงเสียดทาน การหล่อลื่นและการสึกหรอ เช่น ความต้องการพัฒนาเครื่องยนต์ที่ทันสมัยเพื่อสามารถใช้งานได้ในอุณหภูมิและความเร็วสูง การพัฒนาวัสดุใหม่นั้นมีความต้องการเป็นอย่างมาก โดยที่วัสดุผสมโลหะนั้นเป็นที่น่าจับตาของทั่วโลกเนื่องมาจากสมบัติเชิงกลและสมบัติที่เกี่ยวข้องกับแรงเสียดทาน การหล่อลื่นและความต้านทานการสึกหรอที่ดี วัสดุล้ำสมัยเหล่านี้จะใช้โลหะเป็นเนื้อหลักและจะเติมวัสดุอื่นๆให้กระจายในเนื้อโลหะผสมนั้น เช่น เส้นใย อนุภาค หรือ Whiskers เป็นต้น เพื่อจะใช้ในการประยุกต์ใช้งานที่ต้องการเกี่ยวข้องกับแรงเสียดทาน การหล่อลื่นและการสึกหรอ วัสดุผสมที่มีโลหะเป็นเนื้อหลักนั้นจะต้องรับแรงโดยปราศจากการบิด การเสียรูป หรือ การเสียหาย และสามารถควบคุมการสึกหรอให้อยู่ในระยะเวลาการใช้งานที่ยาวนาน ภายใต้สภาวะเงื่อนไขที่กำหนดได้ ตัวอย่างชิ้นงานที่ผลิตจากวัสดุผสมที่มีโลหะเป็นเนื้อหลักนั้น ได้แก่ แบตเตอรี่ เครื่องประกับเพลลา ลูกสูบ กระบอกสูบ และครัมเบรค เป็นต้น

2.6 สมบัติเชิงกลของวัสดุผสมโลหะ

ในวัสดุผสมโลหะ สมบัติเชิงกลของวัสดุผสมจะขึ้นอยู่กับ ปริมาณ ขนาด รูปร่างและการกระจายตัวของเฟสที่ถูกแพร่ในส่วนต่างๆ จากสมบัติเชิงกลของเนื้อวัสดุและในธรรมชาติของส่วนอินเตอร์เฟส โดยมีนิยามคือวัสดุผสมต่างๆไปต้องการปริมาณการแพร่ของเฟส ($>1 \text{ vol}\%$) อนุภาค ($> 1 \mu\text{m}$) จึงจะสามารถทนทานและสามารถควบคุมการเคลื่อนที่ของดิสโลเคชันได้ ซึ่งจะส่งผลโดยตรงกับความแข็งแรงของวัสดุผสมนั้นๆ การกระจายตัวของอนุภาคที่แข็งจะทำให้เพิ่มค่าความแข็งแรงกับวัสดุผสม ส่วนในวัสดุผสมที่มีอนุภาคอ่อนจะทำให้ค่าแรงโมดูลัสอ่อนต่ำกว่าดั่งนั้นวัสดุผสมที่ใส่อนุภาคอ่อน เช่น กราไฟต์ จะมีค่าความแข็งแรงต่ำกว่าแต่สามารถลดแรงเสียดทานได้ดีกว่าเมื่อเทียบกับวัสดุผสมที่มีอนุภาคแข็ง ค่าความแข็งแรงของวัสดุผสมนั้นเพิ่มขึ้นเมื่อบรรจุอนุภาคที่มีความแข็ง โดยคิดเทียบกับปริมาณของอนุภาคต่างๆในวัสดุผสม อย่างไรก็ตามถ้าต้องการความเหนียวของวัสดุผสมนั้นจะบรรจุอนุภาคอ่อนลงไปและลดปริมาณอนุภาคที่แข็งลง พฤติกรรมของแรงเสียดทาน การหล่อลื่นและการสึกหรอของอนุภาควัสดุผสมโลหะและการสึกหรอแบบไถลของวัสดุผสมโลหะขึ้นอยู่กับธรรมชาติของอนุภาคตัวเสริมแรงในเนื้อหลัก อนุภาคที่ถูกเลือกสามารถที่จะมีค่าความแข็งแรงหรืออ่อนกว่าเนื้อหลักก็ได้ อนุภาคเซรามิกต่างๆไปที่ถูกใช้คือ คาร์บอน ซิลิกอนคาร์ไบด์และอะลูมินา อนุภาคต่างๆที่

ไม่ใช่โลหะที่ถูกเลือกใส่เข้าไปในวัสดุผสมนั้นได้ถูกพัฒนาโดยตลอดคั้งตารางที่ 1 สามารถแบ่งออกเป็น 2 กลุ่ม โดยใช้ค่าความแข็งเป็นเกณฑ์ คือ กลุ่มที่ 1 ความแข็งมากกว่า 4-30 GPa เช่น SiC, Al₂O₃ และ Silica เป็นต้น กลุ่มที่ 2 ความแข็งน้อยกว่า 2 GPa เช่น Graphite และ MoS₂ ความแข็งเป็นสิ่งพื้นฐานที่จะถูกพิจารณาสำหรับการหล่อขึ้นรูปด้วยของแข็ง การเลือกใช้วัสดุเสริมแรงจำพวกอนุภาคจะทำให้มีราคาถูกลงกว่าเส้นใยเสริมแรง อีกทั้งยังคงสมบัติเชิงกลและสมบัติทางกายภาพต่างๆไปได้ใกล้เคียงกัน ถ้าเป็นวัสดุผสมโลหะที่มาจากการหล่อขึ้นรูปจะมีราคาถูกที่สุด และยังพบว่าสามารถนำไปใช้งานทางด้านชิ้นส่วนวิศวกรรมที่ต้องการคำนึงถึงเรื่องแรงเสียดทาน การหล่อขึ้นรูปและการสึกหรอเป็นจำนวนมาก

ตารางที่ 2.2 ค่าความหนาแน่นและความแข็งของอนุภาคที่ถูกเลือกสำหรับวัสดุผสมโลหะ

(Kestursatya, 2003)

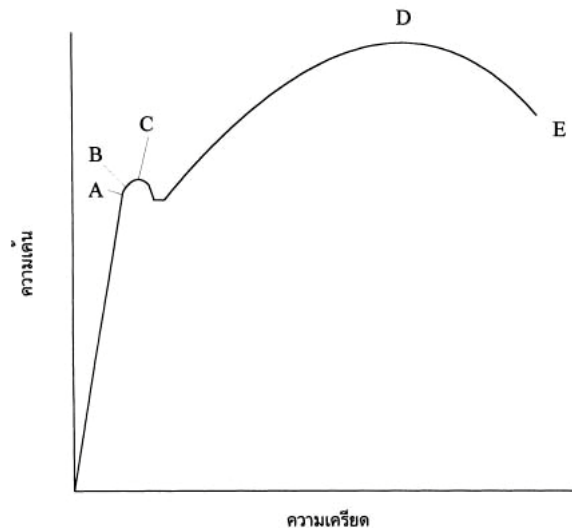
Particle type	Density		Mohs hardness	Hardness	
	g/cm ³	lb/in ³		GPa	ksi
TiC	4.93	0.178	9	20-30	2900-4350
SiC	3.22	0.116	9-9.5	24.5-29	3550-4205
Al ₂ O ₃	3.97	0.143	9	18-26	2610-3770
WC	15.63	0.565	8-9	24	3480
TiN	5.22	0.189	...	20.61	2990
Si ₃ N ₄	3.44	0.125	...	16-20	2320-2900
VC	5.77	0.208	...	16-18	2320-2610
TiO ₂	4.26	0.154	6-6.5	12.7	1840
ZrSiO ₄	4.56	0.165	7.5	11	1595
ZrO ₂	5.89	0.213	...	6.5-10	940-1450
SiO ₂	2.65	0.096	7	8	1160
MgO	3.55-3.68	0.128-0.132	5.5
Glass	2.48-2.54	0.090-0.092	4.5-6.5	4	580
Mica	2.7-2.8	0.098-0.10	2.8	0.3	43.5
Talc	2.58-2.83	0.093-0.102	1-2
MoS ₂	4.62-4.8	0.167-0.173	1-1.5
Graphite	2.09-2.23	0.076-0.081	0.5-1	0.25	36
PTFE	2.13	0.077	...	<0.2	<29

2.7 สมบัติเชิงกลของวัสดุและการทดสอบสมบัติเชิงกล

สมบัติเชิงกลของวัสดุ เช่น ความแข็ง (Hardness) ความแข็งแรง (Strength) ความเหนียว (Ductility) เป็นสิ่งที่จะบอกว่าวัสดุนั้นๆ สามารถที่จะรับหรือทนทานแรง หรือพลังงานเชิงกลภายนอกที่มากระทำได้ดีมากน้อยเพียงใด ในงานวิศวกรรมสมบัติเชิงกลมีความสำคัญมากที่สุด เพราะเมื่อเราจะเลือกใช้วัสดุใดๆ ก็ตาม สิ่งแรกที่จะนำมาพิจารณาก็คือ สมบัติเชิงกลของมัน การที่เครื่องจักรหรืออุปกรณ์ใดๆ จะสามารถทำงานได้อย่างปลอดภัยขึ้นอยู่กับสมบัติเชิงกลของวัสดุที่ใช้ทำเครื่องจักร อุปกรณ์นั้นๆ เป็นสำคัญ

2.7.1 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียด (Stress-Strain Relationship)

ในการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียด ในที่นี้เราจะใช้เส้นโค้งความเค้น-ความเครียด (Stress-Strain Curve) ซึ่งได้จากการทดสอบแรงดึง (Tensile Test) เป็นหลัก โดยจะพลอตค่าของความเค้นในแกนตั้งและความเครียดในแกนนอน ดังรูปที่ 2.3 การทดสอบแรงดึง นอกจากจะให้ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น-ความเครียดแล้ว ยังจะแสดงความสามารถในการรับแรงดึงของวัสดุ ความเปราะ เหนียวของวัสดุ (Brittleness and Ductility) และบางครั้งอาจใช้บอกความสามารถในการขึ้นรูปของวัสดุ (Formability) ได้อีกด้วย



รูปที่ 2.3 เส้นโค้งความเค้น-ความเครียด (Stress-Strain Curve) แบบมีจุดคราก (Yield Point) (แม่น, 2544)

2.7.2 การทดสอบแรงดึง (Tension Test)

วิธีการทดสอบนั้น เราจะนำตัวอย่างที่จะทดสอบมาดึงอย่างช้า ๆ แล้วบันทึกค่าของความเค้นและความเครียดที่เกิดขึ้นไว้ แล้วมาพลอตเป็นเส้นโค้งดังรูปที่ 2.3 ขนาดและรูปร่างของชิ้นทดสอบมีต่าง ๆ กันขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุนั้น ๆ มาตรฐานต่างๆของการทดสอบ เช่น มาตรฐานของ ASTM (American Society of Testing and Materials), BS (British Standards), JIS (Japanese Industrial Standards) หรือแม้แต่ มอก. (มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมไทย) ได้กำหนดขนาดและรูปร่างของชิ้นทดสอบไว้ ทั้งนี้เพื่อให้ผลของการทดสอบเชื่อถือได้ พร้อมกับกำหนดความเร็วในการเพิ่มแรงกระทำเอาไว้ด้วย

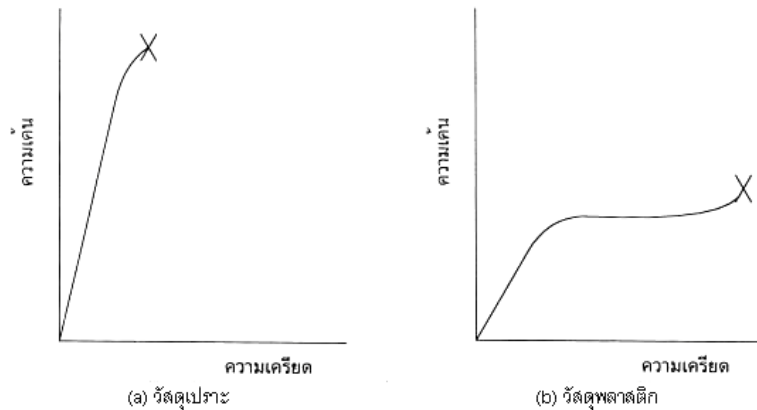
จากการศึกษาเส้นโค้งความเค้น-ความเครียด รูปที่ 2.3 เราพบว่า เมื่อเราเริ่มดึงชิ้นทดสอบอย่างช้า ๆ ชิ้นทดสอบจะค่อย ๆ ยืดออก จนถึงจุดจุดหนึ่ง (จุด A) ซึ่งในช่วงนี้ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น-ความเครียดจะเป็นสัดส่วนคงที่ ทำให้เราได้กราฟที่เป็นเส้นตรง ตามกฎของฮุก (Hook's Law) ซึ่งกล่าวไว้ว่าความเค้นเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความเครียด จุด A นี้ เรียกว่าพิสัยสัดส่วน (Proportional Limit) และภายใต้พิสัยสัดส่วนนี้ วัสดุจะแสดงพฤติกรรมการคืนรูปแบบยืดหยุ่น (Elastic Behavior) นั่นคือเมื่อปล่อยแรงกระทำ ชิ้นทดสอบจะกลับไปมีขนาดเท่าเดิม

เมื่อเราเพิ่มแรงกระทำต่อไปจนเกินพิสัยสัดส่วน เส้นกราฟจะค่อย ๆ โค้งออก จากเส้นตรง วัสดุหลายชนิดจะยังคงแสดงพฤติกรรมการคืนรูปได้อีกเล็กน้อยจนถึงจุด ๆ หนึ่ง (จุด B) เรียกว่า พิสัยยืดหยุ่น (Elastic Limit) ซึ่งจุดนี้จะเป็นจุดกำหนดว่าความเค้นสูงสุดที่จะไม่ทำให้เกิดการแปรรูปถาวร (Permanent Deformation or Offset) กับวัสดุนั้น เมื่อผ่านจุดนี้ไปแล้ววัสดุจะมีการเปลี่ยนรูปอย่างถาวร (Plastic Deformation) ลักษณะการเริ่มต้นของความเครียดแบบพลาสติกนี้เปลี่ยนแปลงไปตามชนิดของวัสดุในโลหะหลายชนิด เช่น พวกเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ (Low Carbon Steel) จะเกิดการเปลี่ยนรูปอย่างรวดเร็ว โดยไม่มีการเพิ่มความเค้น (บางครั้งอาจจะลดลงก็มี) ที่จุด C ซึ่งเป็นจุดที่เกิดการเปลี่ยนรูปแบบพลาสติก จุด C นี้เรียกว่าจุดคราก (Yield Point) และค่าของความเค้นที่จุดนี้เรียกว่า ความเค้นจุดคราก (Yield Stress) หรือ Yield Strength ค่า Yield Strength นี้มีประโยชน์กับวิศวกรมาก เพราะเป็นจุดแบ่งระหว่างพฤติกรรมการคืนรูปกับพฤติกรรมการคงรูป และในกรณีของโลหะจะเป็นค่าความแข็งแรงสูงสุดที่เราจะใช้ประโยชน์ได้โดยไม่เกิดการเสียหาย

หลังจากจุดครากแล้ว วัสดุจะเปลี่ยนรูปแบบพลาสติกโดยความเค้นจะค่อย ๆ เพิ่มขึ้นอย่างช้า ๆ หรืออาจจะคงที่จนถึงจุดสูงสุด (จุด D) ค่าความเค้นที่จุดนี้เรียกว่า Ultimate Strength หรือความเค้นแรงดึง (Tensile Strength) ซึ่งเป็นค่าความเค้นสูงสุดที่วัสดุจะทนได้ก่อนที่จะขาดหรือแตก

ออกจากกัน (Fracture) เนื่องจากวัสดุหลายชนิดสามารถเปลี่ยนรูปร่างอย่างพลาสติกได้มาก ๆ ค่าความเค้นสูงสุดนี้สามารถนำมาคำนวณใช้งานได้ นอกจากนี้ ค่านี้อาจใช้เป็นดัชนีเปรียบเทียบคุณสมบัติของวัสดุได้ด้วยว่า คำว่า ความแข็งแรง (Strength) ของวัสดุ หรือ กำลังวัสดุนั้น โดยทั่วไป จะหมายถึงค่าความเค้นสูงสุดที่วัสดุทนได้นี้เอง

ที่จุดสุดท้าย (จุด E) ของกราฟ เป็นจุดที่วัสดุเกิดการแตกหรือขาดออกจากกัน (Fracture) สำหรับโลหะบางชนิด เช่น เหล็กกล้าคาร์บอนต่ำหรือโลหะเหนียว ค่าความเค้นประลัย (Rupture Strength) นี้จะต่ำกว่าความเค้นสูงสุด เพราะเมื่อเลยจุด D ไป พื้นที่ภาคตัดขวางของตัวอย่างทดสอบลดลง ทำให้พื้นที่ที่จะต้านทานแรงดึงลดลงด้วย ในขณะที่เรายังคงคำนวณค่าของความเค้นจากพื้นที่หน้าตัดเดิมของวัสดุก่อนที่จะทำการทดสอบแรงดึง ดังนั้นค่าของความเค้นจึงลดลง ส่วนโลหะอื่น ๆ เช่น โลหะที่ผ่านการขึ้นรูปเย็น (Cold Work) มาแล้ว มันจะแตกหักที่จุดความเค้นสูงสุด โดยไม่มีการลดขนาดพื้นที่ภาคตัดขวาง ดังรูปที่ 2.4 a ทำนองเดียวกับพวกวัสดุเปราะ (Brittle Materials) เช่น เซรามิก ที่มีการเปลี่ยนรูปร่างพลาสติกน้อยมากหรือไม่มีเลย ส่วนกรณีของวัสดุที่เป็นพลาสติกจะเกิดแตกหักโดยที่ต้องการความเค้นสูงขึ้น ดังรูปที่ 2.4 b



รูปที่ 2.4 เปรียบเทียบเส้นโค้งความเค้น-ความเครียดของวัสดุเปราะและวัสดุพลาสติก

(แม็น, 2544)

2.7.3 ความแข็ง (Hardness)

ความแข็งเป็นความต้านทานการเจาะทะลุ (Penetration) หรือการเสียดสี (Abrasion) ของวัสดุ ความแข็งของวัสดุเกี่ยวข้องกับการจับตัวของอะตอมและโมเลกุลภายในเนื้อวัสดุ

เช่นเดียวกันกับความแข็งแรง ดังนั้นความแข็งมักจะเพิ่มเมื่อวัสดุมีความแข็งแรงสูงขึ้นนั่นคือ พลาสติกโหะ และเซรามิกจะแข็งกว่าพวกโพลีเมอร์

การทดสอบความแข็ง มีอยู่หลายวิธี แต่ที่ใช้กันมากที่สุดมี 3 วิธี คือ

1. การทดสอบความแข็งแบบบริเนล (Brinell Hardness Test) วิธีการ คือ ใช้ลูกบอลเหล็กที่ผ่านการชุบแข็งมาอย่างดี ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มม. กดลงบนผิวเรียบของวัสดุที่จะวัด โดยใช้แรง 3000 กก. สำหรับวัสดุแข็ง และ 500 กก. สำหรับวัสดุอ่อน โดยใช้เวลา 30 วินาที เป็นมาตรฐาน จากนั้นวัดเส้นผ่านศูนย์กลางของรอยบุ๋ม (Indentation) นำค่าที่ได้ไปคำนวณ จะได้ค่าความแข็งแบบบริเนล (Brinell Hardness Number) การทดสอบความแข็งแบบบริเนลนี้ ไม่เหมาะสมกับวัสดุแข็ง เนื่องจากความแข็งของหัวกดไม่มากนัก นอกจากนี้ยังไม่เหมาะสมกับชิ้นทดสอบที่บางกว่าขนาดของรอยบุ๋ม

2. การทดสอบความแข็งแบบร็อกเวล (Rockwell Hardness Test) การทดสอบแบบนี้ คล้ายกับการทดสอบแบบบริเนล แต่ใช้หัวกดเล็กกว่าและแรงน้อยกว่า ค่าของแรงที่ใช้และชนิด หรือขนาดของหัวกดจะเปลี่ยนได้ ขึ้นกับสเกลของความแข็งแบบร็อกเวลที่เราจะเลือกใช้ให้เหมาะสมกับชนิดของวัสดุที่จะทดสอบ การอ่านค่าความแข็งจะอ่านโดยตรงจากเครื่อง กล่าวคือ ถ้าความลึกของรอยกดลงไปตื้น ค่าของตัวเลขจะสูง แสดงว่าวัสดุมีความแข็งมาก วิธีการทดสอบจะให้แรงกระทำเล็กน้อย คือ 10 กก. จากนั้นจะเพิ่มแรงกระทำขึ้น ซึ่งอาจจะมีตั้งแต่ 60-100 กก. ขึ้นอยู่กับขนาดและชนิดของหัวกด นอกจากนี้ยังขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุที่จะทดสอบด้วย หัวกดที่ใช้ อาจจะเป็นลูกบอลเหล็กหรือเพชรที่มีรูปกรวย การทดสอบแบบร็อกเวลนี้ ใช้อย่างกว้างขวางเพราะสามารถใช้วัดความแข็งของวัสดุชนิดต่าง ๆ ได้มากกว่า สามารถวัดความแข็งของวัสดุที่การทดสอบแบบบริเนลวัดไม่ได้ การใช้งานสะดวก อ่านค่าได้รวดเร็ว เพราะอ่านโดยตรงจากเครื่อง และเนื่องจากรอยบุ๋มมีขนาดเล็กจึงไม่ทำลายผิวของชิ้นทดสอบ

3. การทดสอบความแข็งแบบวิกเกอร์ (Vickers Hardness Test) การทดสอบแบบวิกเกอร์นี้คล้ายกับบริเนลในแง่ที่ว่า ค่าที่ได้เป็นอัตราส่วนระหว่างแรงที่ใช้ต่อพื้นที่ของรอยกด แต่ต่างกันที่หัวกดที่ใช้เป็นเพชรรูปปิระมิด แรงที่ใช้มีตั้งแต่ 5-120 กก. ขึ้นอยู่กับความแข็งของวัสดุ

2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ได้มีการศึกษาค้นคว้าวิจัยในเรื่องของการเติมสารช่วยในการหล่อลงในโลหะต่างๆ เช่น โลหะทองแดง โลหะดีบุกและโลหะบรอนซ์ดีบุกเป็นต้น เพื่อให้ชิ้นวัสดุผสมที่ได้หลังการผสมสารช่วยในการหล่อสามารถหล่อขึ้นตัวเองได้ อาทิเช่นการเติม กราไฟต์ ฟอสฟอรัส แมงกานีส ตะกั่ว CeF_3 , MoS_2 และ WS_2 เพื่อทำการศึกษาเปรียบเทียบว่าสารหล่อขึ้นชนิดใดส่งผลดีมาน้อยเพียงไรกับวัสดุผสมหลังทำการผสมแล้ว โดยได้มีการทดสอบสมบัติเชิงกลต่างๆเช่น ความแข็ง ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน การสึกหรอ สภาพการนำไฟฟ้าเป็นต้น บางกลุ่มวิจัยได้มีการใช้เครื่อง Pin-On-Disc เพื่อหาค่าการสึกหรอ (Prasad(2004), Jinjun(2001)) ของชิ้นงานหลังผสม โดยได้มีการกำหนดค่าแรงในการกดและวัสดุที่จะนำมาใช้ในการทดสอบตามมาตรฐานสำหรับการทดสอบการสึกหรอ

ผลที่ได้คือสารที่เลือกเติมลงไปเพื่อช่วยในการหล่อขึ้นบางชนิด เช่น กราไฟต์ ฟอสฟอรัส แมงกานีส และ WS_2 สามารถลดค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานและการสึกหรอลงได้ (Hirotaka(2003), Rapoport(2003), Baets(1995), Kestursatya(2003), Jinjun(2001), He(2001), Yoshitada(1993), Turhan(2001)) และในส่วนของฟอสฟอรัสสามารถช่วยควบคุมไม่ให้ชิ้นงานเปราะได้ (Aksoy, 2002) แต่ในทางกลับกันการเติมสารบางชนิดไม่เป็นผลดีต่อชิ้นงาน อาทิเช่น การเติม MoS_2 จะทำให้ชิ้นงานเปราะเนื่องจากเกิดโครงสร้างของ $CuMo_2S_3$ (Tsuya(1972), Hirotaka(2003)) ซึ่งจะส่งผลโดยตรงให้ชิ้นงานที่ได้ไม่มีความแข็งแรงพอ

ทั้งนี้ได้มีการศึกษาเพิ่มเติมในกรณีศึกษาพิเศษที่น่าสนใจต่างๆ เช่น การศึกษาการเกิดเฟสอัญรูปในระบบของทองแดง ดีบุกและฟอสฟอรัสโดยใช้วิธีการโลหะผสมเชิงกล ทำการกำหนดสัดส่วนต่างๆไว้คือเวลาที่ใช้ในการบดที่ 28, 20, 12 และ 32 ชั่วโมงกับปริมาณผงดีบุกที่ 4, 5, 8 และ 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ตามลำดับ ผลการศึกษาของ Zhang Bangwei สรุปว่าเวลาที่ใช้ในการบดต้องมากกว่า 28 ชั่วโมงและจะไม่เกิดเฟสอัญรูปเลยถ้าปริมาณของดีบุกน้อยกว่า 4 และมากกว่า 15 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนัก ได้มีการศึกษาการทดสอบทางทะเลเพื่อเปรียบเทียบพฤติกรรมการสึกหรอของวัสดุแบร์ริงที่ใช้ในงานในทะเล 6 ชนิด โดยใช้น้ำหนักกดและไถลในน้ำทะเล วัสดุที่ถูกนำมาทดสอบคือ บรอนซ์ อะลูมิเนียม บรอนซ์กราไฟต์ Lamellar Cast Iron, Nodular Cast Iron, PA และ PETP ผลที่ได้จากการทดลองคือ บรอนซ์กราไฟต์มีค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานต่ำกว่าบรอนซ์อะลูมิเนียม 6 เท่า เหล็กหล่อทั้งสองชนิดไม่เหมาะที่จะนำมาทำแบร์ริง ส่วน PA และ PETP มีค่าอัตราการสึกหรอน้อยกว่าบรอนซ์วัสดุที่ดีที่สุดสำหรับการทดลองนี้คือ PA และแนะนำว่าเหมาะที่จะใช้ทำแบร์ริง (Baets, 1995) ได้มีการ

ศึกษาเรื่องปัจจัยของแมงกานีสที่มีผลต่อโครงสร้างและสมบัติเชิงกลของบรอนซ์ดีบุกผสมตะกั่ว โดยได้ทำการทดสอบแรงดึง ความล้าและอัตราการสึกหรอผลที่ได้จากการทดลองคือ เมื่อทำการเติมแมงกานีสลงไปจะทำให้อายุการใช้งานของวัสดุเพิ่มขึ้น และส่งผลให้อัตราการสึกหรอลดลง (Turhan, 2001) และได้มีการศึกษาสมบัติของทองแดงและทองแดง-ดีบุกที่เป็นวัสดุผสมหล่อขึ้นตัวเองภายใต้ไหลดบรรยากาศ อุณหภูมิและการแพร่รังสีแบบสุดขั้ว โดยในระยะต้นๆยังไม่มีผู้ใดอธิบายได้ว่า การเพิ่ม MoS_2 จะไปลดความเสียหาย ความแข็งแรง ความหนาแน่น สภาพการนำไฟฟ้าและความร้อน และความแข็ง และสามารถเพิ่มอัตราการถ่ายเทสารหล่อลื่น ในบางกรณีอาจมากกว่า 60% ได้มีการศึกษาเบื้องต้นของวัสดุผสมที่มีทองแดงเป็นเนื้อหลัก โดยได้ศึกษาผลของ ความเข้มข้น ชนิด และ ขนาดอนุภาคของสารหล่อลื่นแข็งและชนิดของโลหะต่อสัมประสิทธิ์ความเสียหาย การสึกหรอ ความแข็งแรง สมบัติทางไฟฟ้า ความพูน และโครงสร้างของวัสดุผสม การวัดสัมประสิทธิ์ความเสียหายจะวัด ณ. อุณหภูมิห้องและในสุญญากาศสูงๆที่อุณหภูมิต่างๆ พบว่า MoS_2 ไม่เหมาะกับทองแดงหรือวัสดุผสมของโลหะผสมทองแดง-ดีบุก เมื่ออบผนึกตัวอย่างที่ อุณหภูมิ 780 °C ในสุญญากาศ เพราะ MoS_2 เกิดปฏิกิริยากับโลหะเหล่านี้ เป็น CuMo_2S_3 แต่ WS_2 จะเสถียรมากและเป็นสารหล่อลื่นที่มีสมบัติที่ดี ปริมาณ WS_2 ที่เหมาะสมคือ 20% โดยน้ำหนักค่าสัมประสิทธิ์ความเสียหายต่ำสุดของวัสดุผสมทองแดง-ดีบุกที่ผสม WS_2 เท่ากับ 0.01 วัดในสุญญากาศและเท่ากับ 0.1 วัดในอากาศ (Tsuya, 1972)