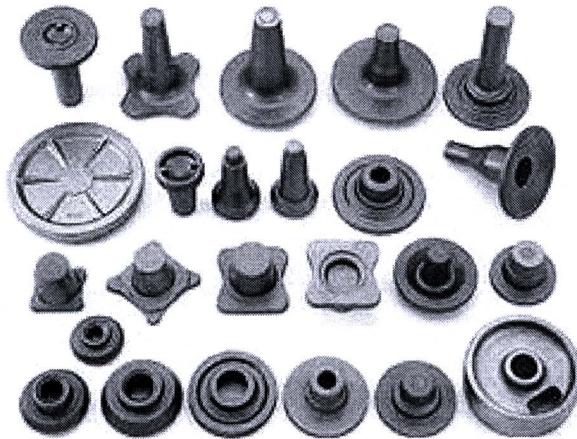


บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย

2.1 ทฤษฎีเกี่ยวกับการทอขึ้นรูปเย็น (Cold forging) [1]

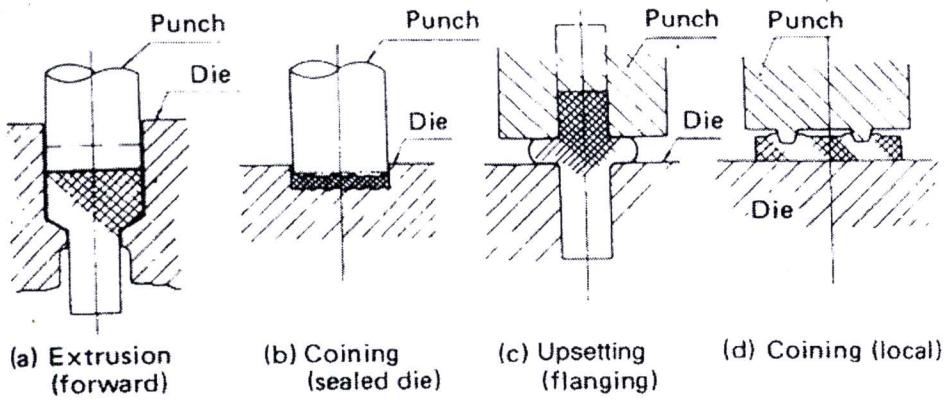
การทอขึ้นรูปเย็นเริ่มใช้งานอย่างจริงจังประมาณครึ่งศตวรรษที่ผ่านมา โดยเริ่มใช้ในการผลิตแป้นเกลิยวและสลักเกลิยว และหลังจากนั้นมีการใช้งานกันอย่างมากในการผลิตชิ้นส่วนประเภทเพลลาของชิ้นส่วนรถจักรยาน รถยนต์ อุปกรณ์ไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ จากการปรับปรุงและพัฒนาวัสดุแม่พิมพ์ การหล่อลิ้น และเครื่องจักรกล รวมทั้งความก้าวหน้าอย่างมากของกระบวนการผลิตและเทคนิคในการออกแบบแม่พิมพ์ จึงสามารถใช้การทอขึ้นรูปงานเย็นนี้ในการผลิตเพลลา เฟือง และชิ้นส่วนรูปร่างซับซ้อนที่ใช้ในรถยนต์ได้ (ดังรูปที่ 2.1)



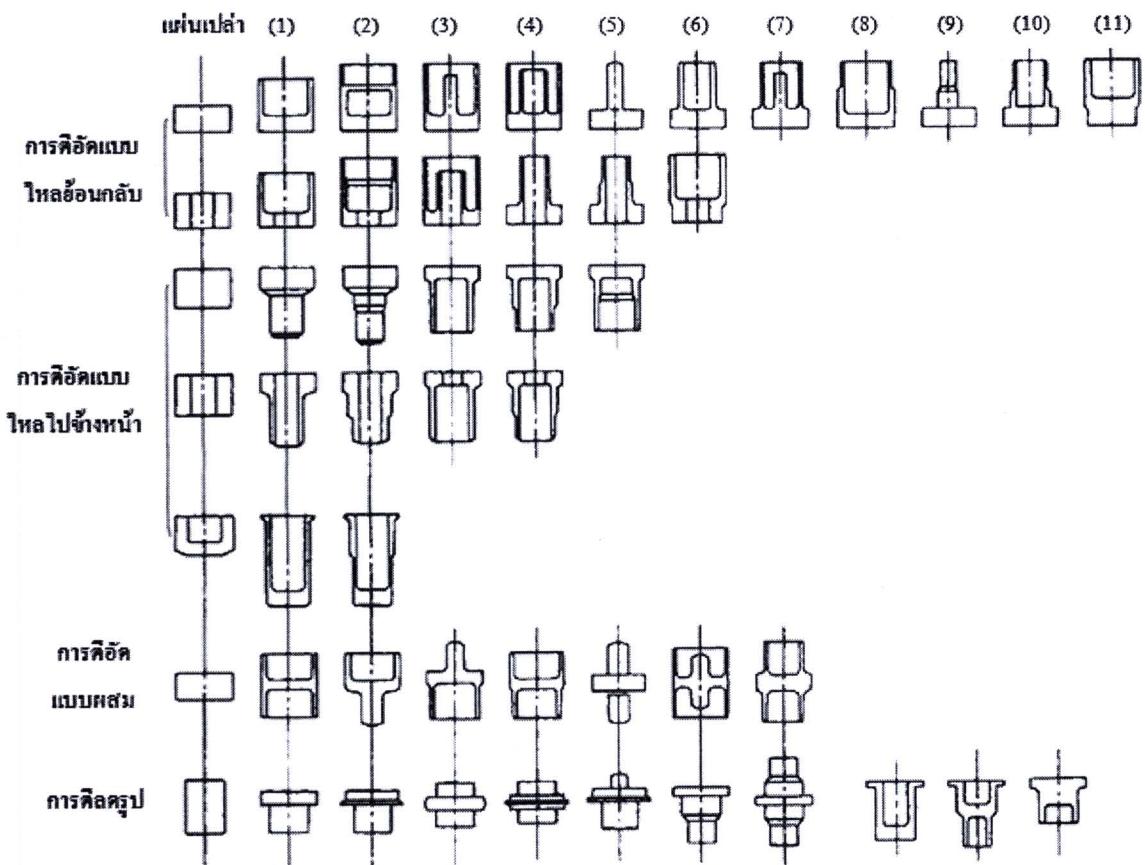
รูปที่ 2.1 แสดงชิ้นงานอลูมิเนียมที่ผลิตจากกระบวนการทอขึ้นรูปเย็น

การทอขึ้นรูปงานเย็นจะทำการขึ้นรูปที่อุณหภูมิปกติ ดังนั้นวัสดุจะต้องมีองค์ประกอบและโครงสร้างที่ขึ้นรูปได้ง่าย และมีพื้นผิวที่ปราศจากข้อบกพร่องต่างๆ แม่พิมพ์ที่ใช้ต้องผลิตจากวัสดุที่มีโครงสร้างที่สามารถทนแรงได้สูง เนื่องจากขณะขึ้นรูปวัสดุจะเกิดการแข็งตัวเพิ่มมากขึ้น (Process Hardening) ทำให้ชิ้นงานเปราะ ดังนั้นจึงต้องใช้หลายขั้นตอนในการขึ้นรูป และในบางกรณีจำเป็นต้องใช้การอบคืนตัว (Annealing) ในระหว่างกระบวนการด้วย แต่กระบวนการทอขึ้นรูปเย็นนี้สามารถผลิตชิ้นงานที่มีความเที่ยงตรงสูงและมีผิวงานที่ดี จึงสามารถนำชิ้นงานนั้นเป็นชิ้นงานสำเร็จได้เลย หรือใช้เครื่องเจียรนัยเพียงเล็กน้อยในขั้นตอนชิ้นงานสำเร็จ หรือกล่าวได้ว่าสามารถขึ้นรูปชิ้นงานแบบใกล้สำเร็จ (Near Net Shape) หรือชิ้นงานสำเร็จ (Net Shape) ได้ เมื่อแบ่งประเภทของการทอขึ้นรูปงานเย็นจะแบ่งออกเป็น 4 ประเภทหลักๆ คือ การตีอัดไหล (Extrusion), การอัดขึ้นลาย (Coining), การทำส่วนหัว

และการตีอัดขึ้นรูปบางส่วน ดังรูปที่ 2.2 ส่วนมากกระบวนการทอบขึ้นรูปจะเป็นกระบวนการที่นำเอากระบวนการขึ้นรูปทั้ง 4 ชนิดนี้มารวมกัน (ดังรูปที่ 2.3 และ 2.4)

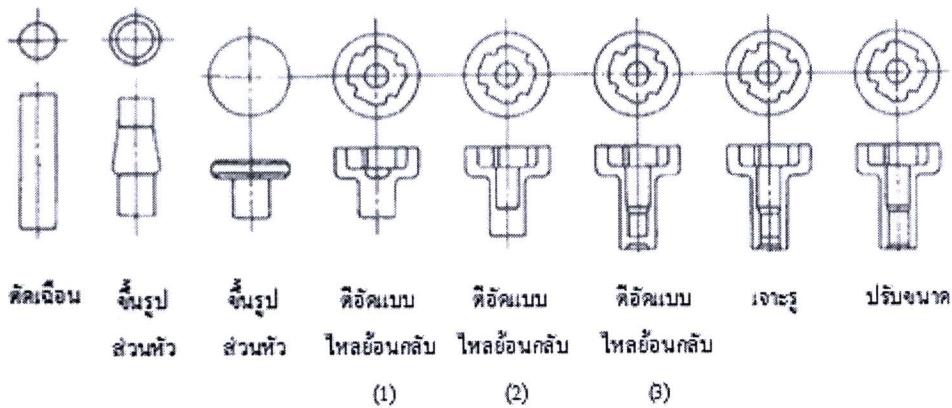


รูปที่ 2.2 แสดงประเภทของการทอบขึ้นรูปเย็น [2]

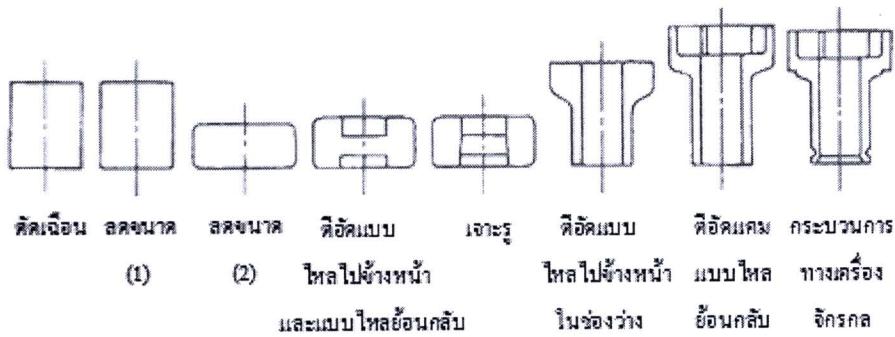


รูปที่ 2.3 แสดงตัวอย่างของชิ้นงานที่ผลิตจากการทอบขึ้นรูปเย็น [3]

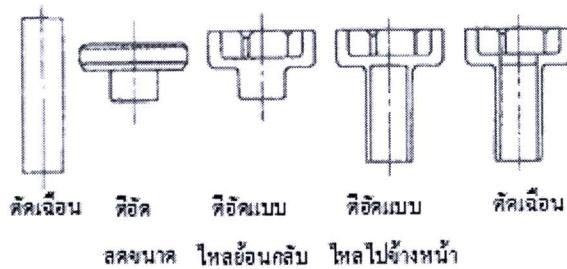
รูปที่ 2.4 แสดงตัวอย่างของกระบวนการขึ้นรูปชิ้นงานกล่องคลัตช์ (Clutch Case) ซึ่งเป็นชิ้นงานที่ผลิตจากกระบวนการเหล่านี้ และถึงแม้ว่าจะเป็นชิ้นงานที่มีรูปร่างเหมือนกันก็ตามแต่ก็จะมีจำนวนขั้นตอนและสภาพของกระบวนการที่ใช้ในการขึ้นรูปที่แตกต่างกันตามเงื่อนไขของชนิด อุปกรณ์ในการทาบขึ้นรูป เทคนิคในการขึ้นรูป การประกอบของชิ้นส่วนที่เกี่ยวข้อง จำนวนการผลิต และอุปกรณ์ที่ใช้ในกระบวนการต่อไป เป็นต้น



(a) ชิ้นงานในแนวแกน



(b) ชิ้นงานรูปทรงท้อ

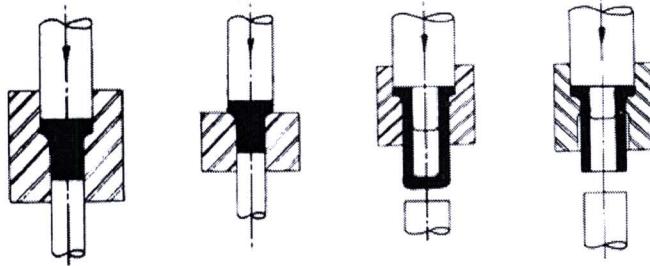


(c) ชิ้นงานรูปร่างพิเศษ

รูปที่ 2.4 แสดงกระบวนการผลิตกล่องคลัตช์ด้วยการทาบขึ้นรูปเย็น [3]

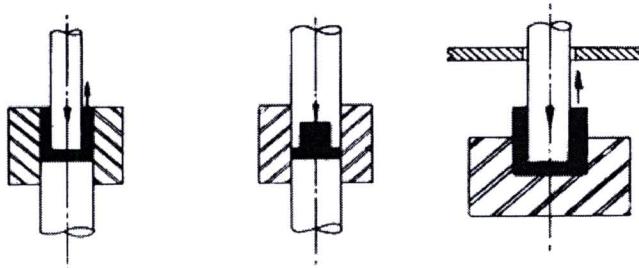
2.1.1 กระบวนการทูลขึ้นรูปแบบอัดไหล (Extrusion) สามารถออกได้เป็น 3 ประเภทดังนี้ [4]

2.1.1.1 การทูลอัดแบบไหลตาม (Forward extrusion) การเคลื่อนตัวของตัวกดและไหลของเนื้อโลหะมีทิศทางเดียวกันเนื้อโลหะจะถูกกดด้วยแรงดันสูงให้ไหลตัวไปทางเดียวกับการเคลื่อนที่ของตัวกด รูปร่างภายนอกของงานจะเป็นไปตามรูปร่างภายในของเบ้าแม่พิมพ์



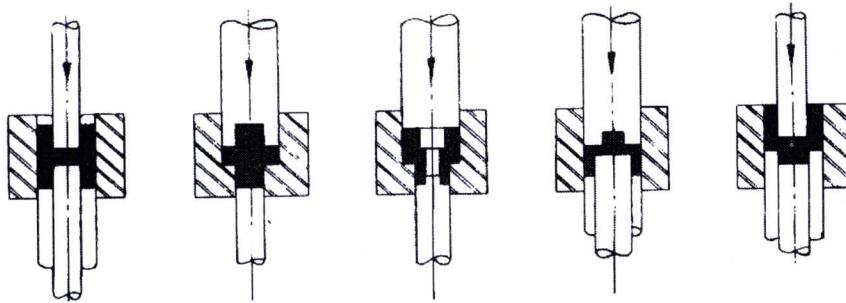
รูปที่ 2.5 การทูลอัดแบบไหลตาม (Forward extrusion)

2.1.1.2 การทูลอัดแบบไหลทวน (Backward extrusion) ทิศทางไหลของวัสดุสวนทางกับการเคลื่อนตัว วัสดุจะไหลตัวและไม่อนุญาตให้เนื้อวัสดุไหลออกด้านข้าง โดยไหลในช่องว่างวงแหวนระหว่างตัวกดเบ้าแม่พิมพ์สวนทิศทางกับแนวเคลื่อนตัว ส่วนใหญ่จะใช้กับการผลิตหลอด



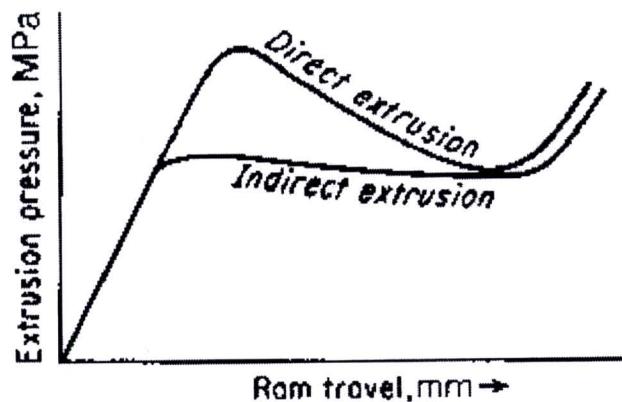
รูปที่ 2.6 การทูลอัดแบบไหลทวน (Backward extrusion)

2.1.1.3 การทูลอัดไหลแบบผสม (Forward and Backward extrusion) ในขณะที่ตัวกดกระแทกลงเนื้อวัสดุส่วนหนึ่งจะไหลในทิศทางเดียวกับการเคลื่อนของตัวกดและเนื้อโลหะอีกส่วนหนึ่งจะไหลสวนทางกับแนวเคลื่อนตัวกด



รูปที่ 2.7 การทอบอัดไหลแบบผสม (Forward & Backward extrusion)

สำหรับการอัดรีดทั้งแบบ Forward extrusion และ Backward extrusion สามารถนำแรงและระยะทางของ Ram ที่กดอัดรีดซึ่งงานมาสร้าง Extrusion Pressure Diagram สำหรับในการศึกษาพฤติกรรมในการอัดรีดซึ่งงานได้ดังรูปที่ 2.8 ในการอัดรีดแบบ Backward extrusion จะไม่มีการเคลื่อนที่สัมผัสกับคอนเทนเนอร์แรงเสียดทานที่เกิดขึ้นจะน้อยกว่า Forward extrusion ทำให้แรงที่ต้องใช้ในการขึ้นรูปน้อยกว่า



รูปที่ 2.8 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกับระยะการเคลื่อนที่ของตัวกด

หลักการในการอัดรีดของ Forward Extrusion or Direct Extrusion รูปแบบของแรงอัดรีดเกิดจากการเพิ่มแรงอัดในคอนเทนเนอร์โดยไม่ใช่สารหล่อลื่นระหว่างการทำงาน ซึ่งงานจะไหลออกจากปากแม่พิมพ์จนแรงที่ใช้ในการอัดรีดเพิ่มขึ้นจนมากที่สุด จากนั้นแรงอัดรีดจะเริ่มลดลงอย่างต่อเนื่อง สาเหตุจากความยาวของวัสดุซึ่งงานลดลงเรื่อยๆ ทำให้ความเสียดทานระหว่างซึ่งงานและคอนเทนเนอร์ลดลงด้วยเหมือนกัน และแรงดันอัดรีดจะเพิ่มขึ้นในตอนสุดท้ายเนื่องจากแรงในการต้านทานการไหลตัวเพิ่มมากขึ้น

สำหรับการอัดรีดแบบ Backward Extrusion or Indirect Extrusion มีรูปแบบของแรงอัดรีดที่เกิดไม่เหมือนกับแบบ Forward Extrusion เนื่องจากความเสียดทานที่เกิดขึ้นน้อย ทำให้ใช้แรงในการอัดรีดน้อยกว่าประมาณ 25-30 %

โดยทั่วไปแล้วงานทอขึ้นรูปเย็น (Cold Forging) มีลักษณะดังนี้

- แรงที่ใช้ในการขึ้นรูปสูง
- เกิด work hardening ทำให้ค่า strength ของชิ้นงานสูงขึ้น
- ได้ผิวสำเร็จดี ลดขั้นตอนการตกแต่งผิว
- ได้มิติชิ้นงานที่เที่ยงตรง
- ค่า Formability จำกัด ใช้ได้เฉพาะ low and medium carbon steel, low alloy steel, copper and light metal

2.2 ทฤษฎีเกี่ยวกับไทรโบโลยี (Tribology) [5]

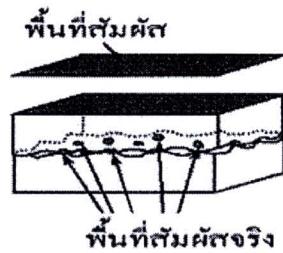
ไทรโบโลยีเป็นสาขาวิชาที่ศึกษาเกี่ยวกับพฤติกรรมที่เกิดขึ้นของการสัมผัสกันระหว่าง 2 พื้นผิวสัมผัสที่มีปฏิกิริยาต่อกันและมีการเคลื่อนที่สัมพัทธ์ต่อกัน โดยหลักการเมื่อผิวสัมผัสมีการเคลื่อนที่ที่หลากหลาย เช่น การลื่นไถล การกลิ้งตัว การเคลื่อนที่แบบไปๆ กลับๆ เป็นต้น ทำให้เกิดปฏิกิริยาในรูปแบบพลังงานทางกลและทางเคมี เมื่อเกิดความเร็วสัมพัทธ์จะทำให้มีการเสียดทานขึ้น เมื่อเกิดการเสียดทานจะก่อให้เกิดการสูญเสียพลังงานในรูปแบบต่างๆ ดังนั้นจึงต้องมีการป้องกันโดยการใช้การหล่อลื่นหรือเลือกใช้วัสดุที่เหมาะสมในการใช้งานเพื่อป้องกันหรือลดการเสียดทานและการสึกหรอที่เกิดขึ้นกับชิ้นงาน ซึ่งปัญหาต่างๆ ของการสึกหรอมีผลทำให้เกิดการสูญเสียค่าใช้จ่ายจำนวนมากในงานอุตสาหกรรม ดังนั้นความรู้ทางด้านไทรโบโลยีจึงมีความสำคัญต่องานอุตสาหกรรมต่างๆ เพื่อมาปรับปรุงและพัฒนาชิ้นส่วน เครื่องมือและอุปกรณ์ในงานอุตสาหกรรมให้มีประสิทธิภาพสูงสุด มีอายุการใช้งานที่นานขึ้น มีการซ่อมบำรุงน้อยลงและลดต้นทุนค่าใช้จ่ายน้อยลง ดังนั้นวิชาไทรโบโลยีจะมี 3 องค์ประกอบที่สำคัญและมีความสัมพันธ์ต่อกันและกันคือ การเสียดทาน (Friction), การหล่อลื่น (Lubrication) และการสึกหรอ (Wear)

2.2.1 ความเสียดทาน (Friction)

ความเสียดทานเป็นแรงต้านการเคลื่อนที่สัมพัทธ์ระหว่างผิว 2 ผิว ซึ่งอาจสัมผัสกันโดยตรงหรือมีของเหลวหรือฟิล์มชั้นอยู่ระหว่างผิวที่มีการเคลื่อนที่สัมพัทธ์กัน ปัญหาสำคัญของความเสียดทานคือทำให้เกิดการสูญเสียพลังงานที่ใส่เข้าไปในระบบเพื่อเอาชนะแรงเสียดทาน ความเสียดทานสามารถแบ่งออกได้ดังนี้คือ

2.2.1.1 ความเสียดทานแบบลื่นไถล (Sliding Friction)

คือการเสียดทานที่เกิดขึ้นจากการเคลื่อนที่แบบลื่นไถลระหว่างผิวสัมผัสที่ไม่มีอาการกลิ้ง ซึ่งเป็นที่ทราบกันดีว่าพื้นผิวทางวิศวกรรมไม่มีพื้นผิวใดที่เรียบจริง เมื่อมองผ่านกล้องที่มีกำลังขยายสูง จะพบว่าผิวจะมีลักษณะที่เป็นคลื่นอยู่ แบบจำลองความเสียดทานจึงขึ้นอยู่กับพื้นที่ผิวสัมผัสจริง (Real Area of Contact) ดังแสดงในรูปที่ 2.9 ซึ่งอาจจะมีบางส่วนที่เมื่อได้รับความเค้นแล้วจะเกิดการเชื่อมติดกัน

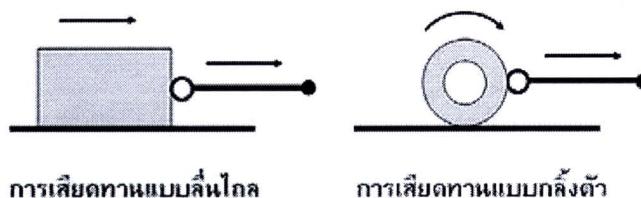


รูปที่ 2.9 พื้นที่ผิวสัมผัสจริงของผิวสัมผัสทั่วไป [6]

2.2.1.2 การเสียดทานแบบกลิ้ง (Rolling Friction)

เกิดขึ้นจากการเคลื่อนที่แบบกลิ้งระหว่างชิ้นงานคู่สัมผัส การเสียดทานแบบนี้คือ การเสียดทานที่เกิดในรางลื่นแบบเม็ดลูกกลิ้ง แม้ว่าโดยทั่วไปแล้วจะมีอนุภาคขนาดเล็กกว่าความเสียดทานแบบลื่นไถลแต่จะมีความซับซ้อนของปรากฏการณ์มากกว่า เนื่องจากความไม่เป็นอิสระในหลายๆตัวแปร เช่น ความผันผวนที่เพิ่มขึ้นของการลื่นไถลของการกลิ้งหรือหมุนของอนุภาคและพลังงานที่สูญเสียไปในขณะที่พื้นผิวในช่วงการเปลี่ยนรูปจากช่วงยืดหยุ่นไปเป็นการเปลี่ยนรูปถาวร ความเสียดทานแบบลื่นไถลอาจจะแบ่งได้เป็น 2 ชนิดใหญ่ๆ

- แรงที่สัมผัสขนาดใหญ่ที่ถูกถ่ายทอด เช่น การลากจูงวัตถุไปตามพื้นและล้อรถ
- แรงที่สัมผัสขนาดเล็กที่ถูกถ่ายทอดเรียกว่า Free Rolling



รูปที่ 2.10 การเสียดทานแบบลื่นไถลและแบบกลิ้งตัว

2.2.2 การสึกหรอ (Wear)

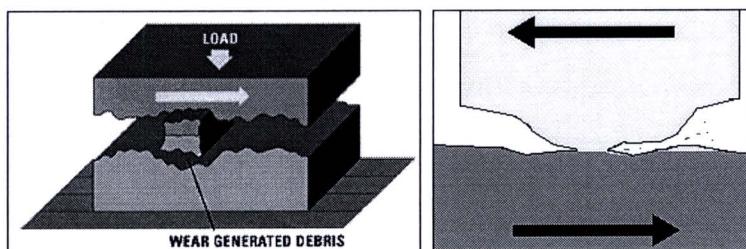
การสึกหรอหมายถึง ความเสียหายของผิววัสดุเนื่องจากการหลุดของผิววัสดุจากการถูกแรงกระทำขณะเคลื่อนที่สัมผัสกับอีกผิวหนึ่งซึ่งจะส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนรูปร่างหรือการสูญเสียเนื้อบริเวณผิวสัมผัสนั้น การสึกหรอเกิดขึ้นได้หลายรูปแบบดังต่อไปนี้

2.2.2.1 รูปแบบการสึกหรอ

พฤติกรรมการสึกหรอมีความซับซ้อนเนื่องจากมีปัจจัยหลายอย่างเข้ามาเกี่ยวข้อง การสึกหรอเกิดขึ้นได้หลายรูปแบบ เช่นการสึกหรอจากการไถระหว่างผิว การขัดถูของอนุภาคกับผิวสัมผัส การชนกันเองของอนุภาคขนาดเล็กหรือของเหลวกับผิว การสึกหรอจะเกิดขึ้นช้าหรือเร็วขึ้นอยู่กับองค์ประกอบหลายขององค์ประกอบ เช่น โครงสร้างจุลภาคของผิว ชนิดของวัสดุ ลักษณะการเคลื่อนที่ของวัสดุ ลักษณะของแรง ปฏิกริยาทางเคมีและอุณหภูมि เป็นต้น การสึกหรอที่พบโดยทั่วไปมักจะมี ความซับซ้อนมีหลายกลไกที่เกิดขึ้นพร้อมๆกัน บางทีก็ไม่สามารถระบุการสึกหรอที่เกิดได้แน่นอนว่าเป็นชนิดใด ดังนั้นการทำการทดลองหรือวิเคราะห์กลไกการสึกหรอเพื่อหาวิธีป้องกันหรือแก้ไขจึงต้องอาศัยความเข้าใจรูปแบบกลไกการสึกหรอและอิทธิพลของตัวแปรที่เกี่ยวข้องรวมทั้งลักษณะเฉพาะ ในการทดสอบแบบต่างๆ สามารถแบ่งออกเป็นกลุ่มๆได้ 4 กลุ่ม คือ

- การสึกหรอแบบเชื่อมหรือยึดติดกัน (Adhesive Wear)
- การสึกหรอแบบขูดขีด (Abrasive Wear)
- การสึกหรอเนื่องจากการล้าตัว (Fatigue Wear)
- การสึกหรอแบบการกัดกร่อน (Erosive Wear)

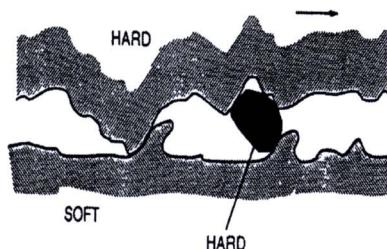
- **การสึกหรอแบบเชื่อมหรือยึดติดกัน (Adhesive Wear)** คือ การสึกหรอที่เกิดจากการเชื่อมติดกันของผิวโลหะ จะเกิดขึ้นเมื่อวัสดุทั้งสองชนิดเกิดการเสียดสีกันเนื่องจากพื้นที่ที่สัมผัสกันระหว่างผิวสองผิวมาก จะทำให้เกิดความเค้นเกินกว่าจุดครากตัวของวัสดุ (Yield Point) และจะทำให้เกิดแรงยึดเกาะกันทางโมเลกุลขึ้น เมื่อให้แรงเพื่อทำให้เกิดการเคลื่อนที่ต่อไปบริเวณการยึดติดกันจะถูกดึงให้หลุดออกมา



รูปที่ 2.11 แสดงการเกิดกลไกการสึกหรอแบบยึดติด [7]

เมื่อผิวหน้าของโลหะ 2 ผิวหน้าเคลื่อนที่เข้ามาสัมผัสกันภายใต้แรงกด พันธะทางโลหะจะสามารถเกิดขึ้นได้ ณ บริเวณจุดสัมผัส พันธะที่เกิดขึ้นในบริเวณที่ยอดสูงของวัสดุมาแตะกันนี้เรียกว่าเป็น พันธะแบบเชื่อมติด (Adhesion) ในขณะที่ผิวหน้า 2 ผิวเคลื่อนที่สัมผัสระหว่างกัน พันธะแบบเชื่อมติดจะสามารถขยับและหลุดแตกออกจากกันได้ ซึ่งมักจะเกิดขึ้นทั้ง 2 ทาง โดยเฉพาะอย่างยิ่งถ้าวัสดุ ทั้ง 2 มีโครงสร้างลักษณะคล้ายกัน หรือมีความเข้ากันได้ทางโครงสร้างที่ดี

- การสึกหรอแบบการขัดถูหรือขีดข่วน (Abrasive Wear) คือ การสึกหรอที่เกิดจาก พฤติกรรมการขีดข่วน ถู ฉีด หรือกระแทก ซึ่งการกระทำเหล่านี้ทำให้เนื้อวัสดุหลุดออกมาใน ลักษณะเป็นอนุภาคเล็ก ๆ กระทำต่อผิวชิ้นงาน [5]

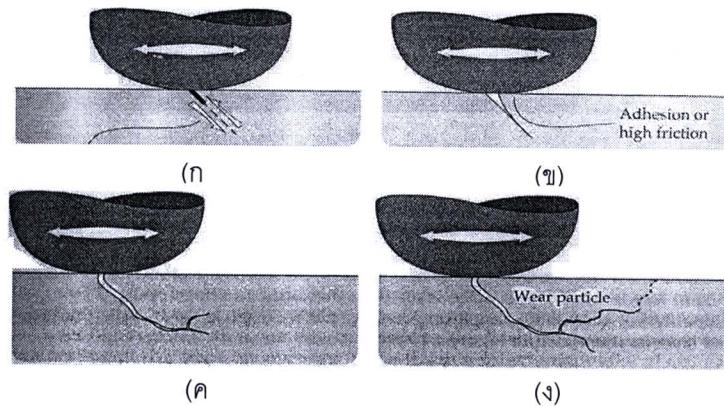


รูปที่ 2.12 ลักษณะการสึกหรอแบบการขัดถูหรือขีดข่วน [6]

การหลุดออกของอนุภาคดังรูปที่ 2.12 ความเป็นพฤติกรรมการขัดถูเป็นระดับความสามารถของ อนุภาคที่ทำให้เกิดการสึกหรอ ซึ่งขึ้นกับหลายตัวแปร เช่นความแข็ง ถ้าความแข็งของวัสดุมากกว่า 1.2 เท่าของความแข็งของอนุภาค ความสามารถของอนุภาคในการเจาะเข้าทำลายผิวก็ยิ่งน้อย อนุภาคที่มีความแข็งมากจะทำให้อัตราการสึกหรอสูง ความแข็งของอนุภาคมีผลต่อการเปลี่ยน (Transition) ของอัตราการสึกหรอด้วย ถ้าค่าความแข็งใกล้เคียงกันพฤติกรรมการขัดถูก็จะขึ้นกับรูปร่างของอนุภาค และความแข็งแรงของอนุภาค อนุภาคที่เป็นเหลี่ยมไม่มน มีความแข็งแรงมากไม่แตกง่ายก็จะทำให้อัตราการสึกหรอสูง อนุภาคขนาดเล็กให้อัตราการสึกหรอต่ำกว่าขนาดใหญ่ เนื่องจากอนุภาคขนาดเล็กไหลตัวได้ง่ายทำให้ความเค้นที่จุดสัมผัสต่ำ [5]

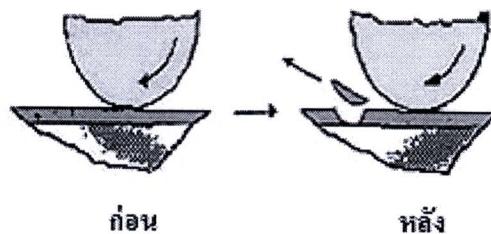
- การสึกหรอเนื่องจากการล้าตัว (Fatigue Wear) การสึกหรอแบบนี้เป็นการสึกหรอที่เกิดขึ้น เนื่องจากการล้าตัวและเกิดการรอยแตก หรือหลุมบนหน้าผิวหน้าวัสดุบริเวณที่มีการล้าตัว โดยมาจาก ชิ้นงานมีการรับภาระเป็นวงรอบ (Stress Cycles) การล้าตัวของวัสดุจะมีโอกาสเกิดขึ้นน้อยมาก หาก ชิ้นงานรับภาระเพียงการกด (Compressive Stress) หรือการดึง (Tensile Stress) เพียงอย่างใดอย่างหนึ่ง แต่จะมีโอกาสเกิดการล้าตัวมากกว่ามีการรับภาระสลับกันไปมาระหว่างการกดกับการดึง หรือ รับภาระแบบเป็นวงกลม ลักษณะการล้าตัวอีกแบบหนึ่งเกิดจากการมีสิ่งสกปรกในสารหล่อลื่นและทำ

ให้เกิดรอยกด (Dents) ขึ้นบนผิวชิ้นงานก่อนและเมื่อใช้งานไปนานๆ รอยกดจะค่อยๆ แพร่กระจายออกไปเป็นรอยแตก (Crack) เนื่องจากน้ำมันหล่อลื่นเข้าไปอยู่ในรอยกดนั้นๆ ครั่งแล้วครั่งเล่าและเกิดเป็นหลุมในชิ้นส่วนทางกล ทางที่มักเกิดการล้าตัวที่ผิววัสดุ



รูปที่ 2.13 แสดงการเกิดกลไกการสึกหรอการล้าตัว [7]

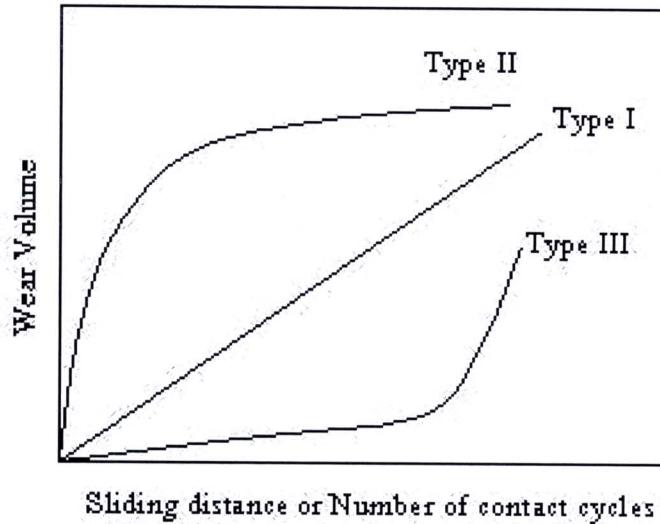
- การสึกหรอจากการกัดกร่อน (Corrosion Wear) คือการสึกหรอที่เกิดจากการเกิดออกซิเดชัน (Oxidation) ขึ้นที่ผิวของวัสดุทำให้ผิวเกิดจุดบกพร่องขึ้น เมื่อแรงกระทำที่ผิวเพิ่มสูงขึ้น เนื้อโลหะตรงบริเวณยอดผิว (Asperity) หลุดออกจากผิวของวัสดุทำให้พื้นที่สัมผัสของผิวสองผิวเพิ่มขึ้น เกิดการสึกหรอแบบการเชื่อมหรือยึดติดได้ง่ายขึ้น [5]



รูปที่ 2.14 ลักษณะการสึกหรอที่เกิดจากการกัดกร่อน [7]



2.2.2.2 แนวโน้มการสึกหรอ แบ่งเป็น 3 รูปแบบ



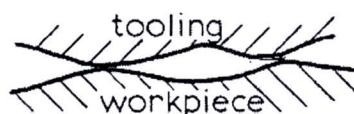
รูปที่ 2.15 ชนิดของแนวโน้มทางการสึกหรอ [8]

จากรูปที่ 2.15 แสดงกราฟจากการทดลองการสึกหรอสามารถแบ่งออกเป็น 3 แบบคือ แบบที่ 1 (Type I) เป็นลักษณะของอัตราการเกิดการสึกหรอเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องตลอดเวลา การทดลองแบบที่ 2 (Type II) อัตราการสึกหรอเกิดขึ้นในช่วงแรก จากนั้นอัตราการสึกหรอจะเริ่มลดลงและมีแนวโน้มคงที่ ซึ่งการสึกหรอแบบนี้จะเกิดกับวัสดุที่เป็นโลหะ แบบที่ 3 (Type III) อัตราการสึกหรอจะเกิดขึ้นต่ำในช่วงแรกและจะเพิ่มสูงขึ้นเมื่อจำนวนการทดลองเพิ่มขึ้นจากการแตกของวัสดุเนื่องจากความล้า การสึกหรอแบบนี้เกิดขึ้นกับวัสดุที่เป็นเซรามิก

2.2.3 สารหล่อลื่น (Lubricant)

2.2.3.1 กลไกการหล่อลื่น [5]

- ภาวะไร้สารหล่อลื่น (Non Lubricant) ในสภาวะการหล่อลื่นแบบนี้ผิวสัมผัสของคู่วัสดุจะสัมผัสกันโดยตรง และมีผลทำให้เกิดความเสียหายหรือสึกหรออย่างรุนแรงบนผิวหน้าของคู่สัมผัส ความเรียบผิวจะมีอิทธิพลมากในการหล่อลื่น ซึ่งผิวคู่สัมผัสจะเป็นตัวหล่อลื่นเองและมีการสูญเสียเนื้อวัสดุบริเวณผิวหน้าในกรณีนี้เป็นปริมาณสูงมาก



รูปที่ 2.16 ภาวะไร้สารหล่อลื่น

- การหล่อลื่นแบบบาวนด์คาร์ (Boundary Lubricant) ในลักษณะนี้ผิวคู่สัมผัสโดยส่วนใหญ่จะถูกปกคลุมด้วยชั้นผิวหน้าของวัสดุที่เกิดปฏิกิริยาเคมีหรือการดูดกลืนอะตอม ดังนั้นในระหว่างการขัดสีในการใช้งาน ชั้นผิวเหล่านี้จะถูกขจัดสลับเนื้อวัสดุ และด้วยค่าความเสียดทานต่อการเฉือนตัวที่ต่ำกว่าเนื้อคู่สัมผัสทำให้ชั้นผิวหน้าเหล่านี้สึกหรอออกไปก่อนและจะตามด้วยผิวชั้นใหม่ที่จะเกิดจากปฏิกิริยา หรือการดูดกลืนอะตอมขึ้นมาทดแทนผิวหน้าเดิมไปเป็นระยะๆ ดังนั้นผิวหน้าเหล่านี้จึงทำหน้าที่ปกป้องเนื้อวัสดุของคู่สัมผัสจากการสึกหรอได้ อีกส่วนหนึ่งก็คือ การใช้สารหล่อลื่นที่ไม่เพียงแต่ช่วยทำให้เกิดชั้นผิวเหล่านี้ขึ้นมาใหม่ แต่ยังจะทำให้มีการปิดหรืออุดบริเวณที่เป็นร่องหลุมบนผิวด้านในของคู่สัมผัสได้อีกด้วย



รูปที่ 2.17 การหล่อลื่นแบบบาวนด์คาร์

- การหล่อลื่นแบบกึ่งสมบูรณ์ (Mixed Film Lubricant) ภายใต้การหล่อลื่นแบบกึ่งสมบูรณ์นี้ผิวสัมผัสที่ลื่นไถลไปจะมีฟิล์มน้ำมันแยกเนื้อวัสดุออกได้เพียงบางส่วน และมีบางส่วนของผิวของเนื้อวัสดุ (Asperities) จะสัมผัสกันโดยตรง ผลที่เกิดขึ้นคือแรงกระทำในแนวตั้งบางส่วนจะถูกรองรับไว้โดยแรงดันของฟิล์มน้ำมัน แต่ก็ยังมีแรงกระทำหรือภาวะที่เกิดขึ้นอีกบางส่วนที่รองรับโดยผิวเนื้อวัสดุ



รูปที่ 2.18 การหล่อลื่นแบบกึ่งสมบูรณ์

- การหล่อลื่นแบบสมบูรณ์ (Full Film Lubricant) เป็นการหล่อลื่นที่สารหล่อลื่นหนาพอที่จะแยกผิวคู่วัสดุที่มีการเคลื่อนที่ให้แยกออกจากกันได้โดยสิ้นเชิง สัมประสิทธิ์ความเสียดทานที่เกิดขึ้นในกรณีนี้จะขึ้นอยู่กับค่าของสัมประสิทธิ์ความเสียดทานของชั้นสารหล่อลื่นซึ่งขึ้นอยู่กับค่าความหนืดของสารหล่อลื่นนั้นเพียงอย่างเดียวไม่ขึ้นอยู่กับความเร็วผิวของแม่พิมพ์หรือชิ้นงาน ภายใต้การหล่อลื่นแบบสมบูรณ์นั้นแรงกระทำในแนวตั้งถูกรองรับโดยสารหล่อลื่นโดยตรง ผิวคู่สัมผัสที่มีการเคลื่อนที่จะถูกแยกออกจากกันโดยสิ้นเชิงด้วยตัวของสารหล่อลื่น ดังนั้นจึงไม่มีการเกิดการสัมผัสกันโดยตรงของผิววัสดุเลย ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานที่เกิดขึ้นทั้งหมดจึงมีเฉพาะค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานในสารหล่อลื่นเท่านั้น



รูปที่ 2.19 การหล่อขึ้นแบบสมบูรณ์

2.2.3.2 สารหล่อขึ้น

สารหล่อขึ้นที่ใช้กันอยู่ในปัจจุบันมีอยู่มากมาย ถ้าแบ่งตามสถานะจะแบ่งออกได้เป็นสี่ชนิด คือ ก๊าซ ของเหลว สารกึ่งแข็ง (Semi – Solid) และของแข็ง สารหล่อขึ้นที่เป็นของเหลวจะใช้กันมากที่สุด เพราะมีคุณสมบัติหลากหลายเมื่อนำไปใช้งาน

- ก๊าซ
- ของเหลว
- สารกึ่งแข็ง (Semi – Solid)
- ของแข็ง

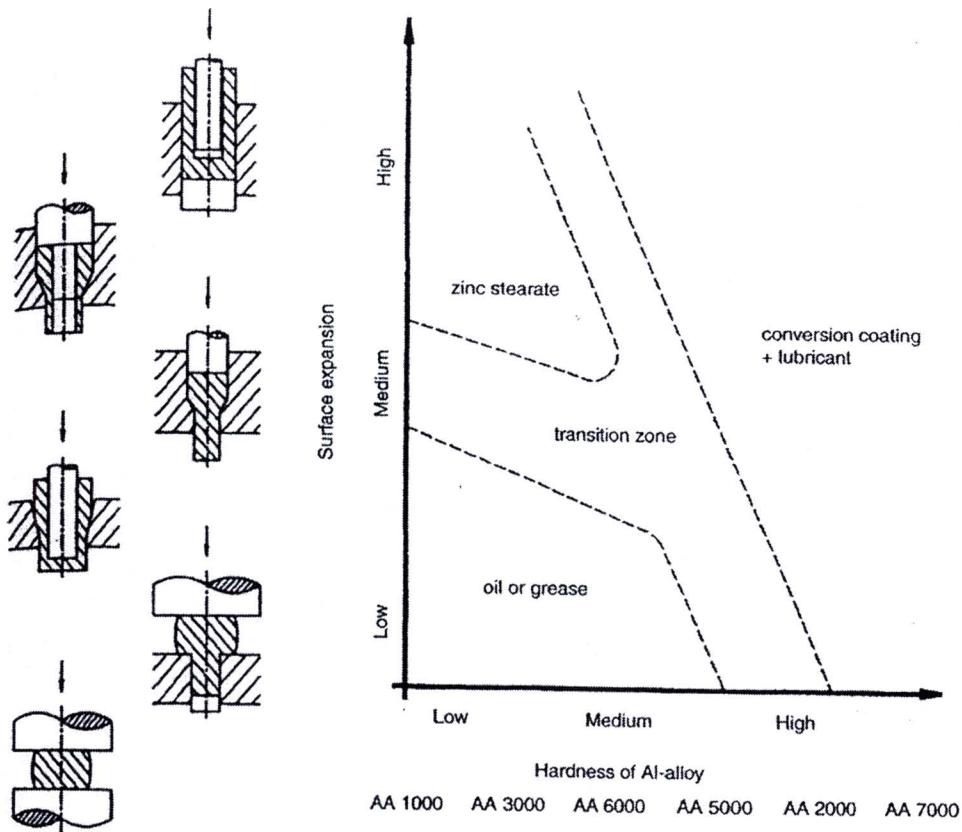
2.3 สารหล่อขึ้นสำหรับกระบวนการทอขึ้นรูปเย็น (Cold forging) [3]

2.3.1 การเลือกชนิดของสารหล่อขึ้น

การเลือกชนิดของสารหล่อขึ้นสำหรับกระบวนการทอขึ้นรูปเย็น (Cold forging) นั้นขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุและ Surface expansion ของการขึ้นรูป ยกตัวอย่างเช่น การขึ้นรูปแบบ Upsetting และ Ironing จะมีค่า Surface expansion ต่ำ ซึ่งการใช้น้ำมันเป็นสารหล่อขึ้นก็เพียงพอกับความต้องการในการขึ้นรูป ส่วนในกรณีของการขึ้นรูปที่มีค่า Surface expansion สูงเช่น การ Extrusion นั้นต้องการระบบของสารหล่อขึ้นที่ดียิ่งขึ้นไปกว่าน้ำมันธรรมดา ซึ่งปัจจัยต่างๆ ที่ควรพิจารณาในการเลือกสารหล่อขึ้นมีดังนี้

- ชนิดของวัสดุ
- ค่า Yield stress ของวัสดุก่อนการขึ้นรูป
- ค่า Strain hardening
- Surface expansion ของการขึ้นรูป
- ความยาก-ง่ายของรูปร่างชิ้นงานที่จะทำการขึ้นรูป
- ความเรียบผิวและความแข็งของแม่พิมพ์ที่ใช้ในการขึ้นรูป

ชนิดของวัสดุและ Surface expansion ในการขึ้นรูปนั้นเป็นปัจจัยที่สำคัญสำหรับการเลือกสารหล่อลื่น จากรูปที่ 2.20 ซึ่งแสดงชนิดของสารหล่อลื่นที่เหมาะสมกับอลูมิเนียมและ Surface expansion ที่แตกต่างกัน ตัวอย่างเช่น Al-alloy AA1000 และ AA3000 นั้นสามารถขึ้นรูปในกรณีที่มี Surface expansion สูงได้โดยไม่ต้องใช้ Conversion coating เป็นสารหล่อลื่น ส่วน Al-alloy AA6000 และ AA5000 นั้นสามารถใช้น้ำมันหรือจาระบีเป็นสารหล่อลื่นได้เฉพาะในกรณีการขึ้นรูปที่มี Surface expansion ต่ำเท่านั้น และสำหรับกรณีของ Al-alloy AA7000 นั้นจำเป็นต้องใช้ Conversion coating เป็นสารหล่อลื่นเท่านั้น ไม่ว่าจะเป็กรณีที่มี Surface expansion สูงหรือต่ำก็ตาม



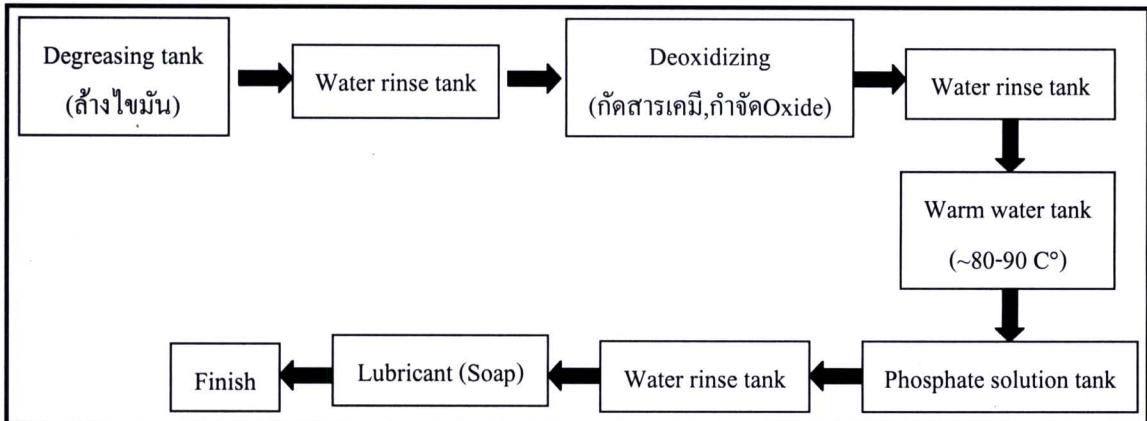
รูปที่ 2.20 แสดงการเลือกสารหล่อลื่นตามรุนแรงในการขึ้นรูป [3]

2.3.2 สารหล่อลื่นที่ใช้ในกระบวนการทอบขึ้นรูปเย็น (Cold forging) [9]

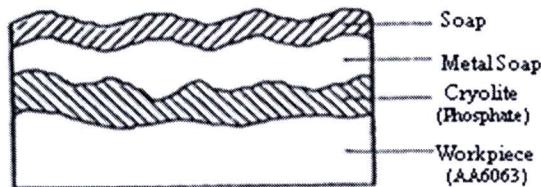
สำหรับสารหล่อลื่นที่นิยมใช้ในงานทอบขึ้นรูปเย็น (Cold forging) ขึ้นงานอลูมิเนียมนั้นมีอยู่ 3 ประเภท คือ

- Soap phosphate coating
- Soap aluminum fluoride coating
- Calcium aluminate coating

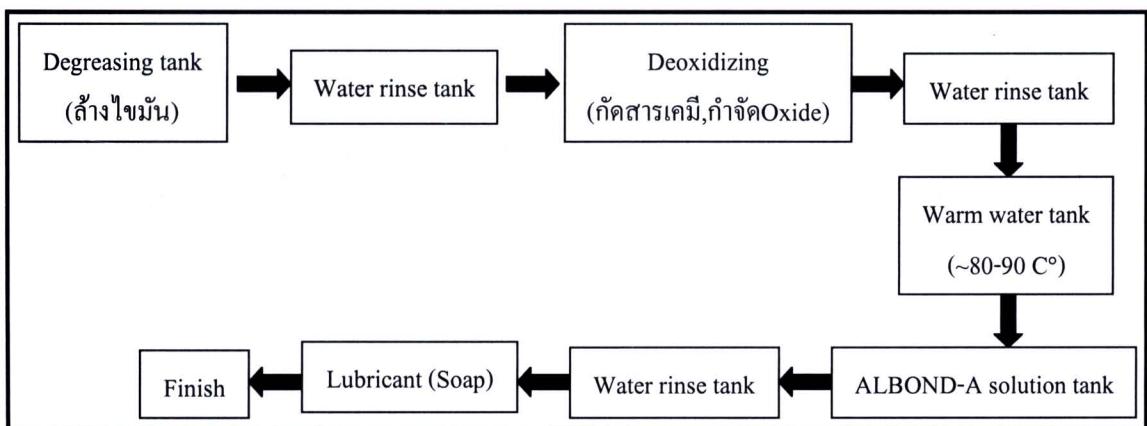
ซึ่งในการใช้ Soap phosphate coating เป็นสารหล่อลื่นนั้นได้รับความนิยมที่สุด ส่วน Soap aluminum fluoride coating และ Calcium aluminate coating นิยมใช้กันมาในญี่ปุ่นและยุโรปตามลำดับ



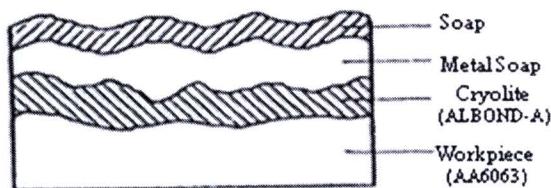
รูปที่ 2.21 แสดงขั้นตอนการทำ Soap phosphate coating [อ้างอิงจาก Thai Parkerizing Co., Ltd]



รูปที่ 2.22 แสดงชั้นต่างๆของ Soap phosphate coating



รูปที่ 2.23 แสดงขั้นตอนการทำ Soap aluminum fluoride coating [อ้างอิงจาก Thai Parkerizing Co., Ltd]



รูปที่ 2.24 แสดงชั้นต่างๆของ Soap aluminum fluoride coating

2.4 วิธีการประเมินสารหล่อลื่น [10]

ต้นทุนค่าใช้จ่ายในเรื่องของสารหล่อลื่นในกระบวนการทอขึ้นรูปเย็น (Cold forging) นั้นถือได้ว่าน้อยมากเมื่อเทียบกับค่าใช้จ่ายในส่วนของวัตถุดิบ อุปกรณ์ และแรงงานเป็นเหตุให้สารหล่อลื่นนั้นไม่มีความสำคัญในเชิงเศรษฐกิจ แต่ความจริงแล้วสารหล่อลื่นเป็นปัจจัยหนึ่งที่สำคัญที่สุดที่ส่งผลกระทบต่อการผลิต เพราะสารหล่อลื่นเป็นสิ่งสำคัญที่ส่งผลต่อชิ้นงานสำเร็จที่ได้ ถ้าสารหล่อลื่นมีปริมาณที่ไม่เพียงพออาจทำให้เกิด Metal to metal contact แต่ถ้ามีปริมาณมากเกินไปอาจทำให้ชิ้นงานไม่เต็มแบบได้ และทำให้การผลิตต้องเกิดการหยุดชะงัก (Breakdown) ดังนั้นการประเมินสารหล่อลื่นจึงเป็นสิ่งสำคัญเพื่อที่จะทำให้ได้ทราบถึงความสามารถในการไหลตัวของสารหล่อลื่นและปริมาณที่เหมาะสมในการใช้สารหล่อลื่นแต่ละชนิด เพื่อให้ได้ชิ้นงานที่มีคุณภาพและป้องกันการหยุดชะงักของกระบวนการผลิต (Breakdown) วิธีการประเมินสารหล่อลื่นแบบ Bench-test นั้นมีหลายวิธี แต่ในที่นี้จะกล่าวเพียง 3 วิธีคือ การทดสอบ Ring compression test, Double cup extrusion test, และ Ball on disc

2.4.1 วิธีการทดสอบแบบ Ring compression test

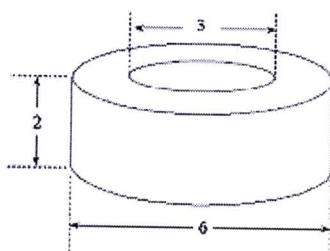
สัมประสิทธิ์ความเสียดทานระหว่างแม่พิมพ์และชิ้นงานจะเกิดขึ้นในทุกขั้นตอนของกระบวนการขึ้นรูปโลหะ สัมประสิทธิ์ความเสียดทานที่เกิดขึ้นนั้นมีผลต่อความเค้น (Stress) ความดัน (Pressure) รูปแบบการไหลตัว (Material Flow) อุณหภูมิ (Temperature) และแรงรวมในการขึ้นรูป (Total Force) ดังนั้นวิธีที่ใช้ในการทดสอบเพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานในการขึ้นรูป (μ) จะนิยมใช้วิธีการทดสอบแรงอัดขึ้นทดสอบรูวงแหวน (Ring compression test) โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อประเมินหาค่าความเค้นในการไหลตัว (Flow Stress: σ_f) ของวัสดุและเพื่อประเมินหาค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน (μ) โดยการทดลองจะต้องอยู่บนสมมติฐานที่ว่า การเปลี่ยนรูปของวัสดุจะต้องเป็นแบบสม่ำเสมอ (Isotropy) และมีความเสียดทานที่คงที่ตลอดการขึ้นรูป เหตุผลสำคัญที่วิธีการทดสอบนี้ได้รับความนิยมเป็นอย่างมากคือ ไม่ต้องมีอุปกรณ์เครื่องมือที่ยุ่งยากซับซ้อน ไม่จำเป็นต้องวัดแรงในการขึ้นรูป

ไม่จำเป็นต้องทราบค่าความแข็งแรงของวัสดุ การทดสอบสามารถใช้ได้อย่างกว้างขวาง โดยไม่จำกัดขอบเขตของความเร็วในการขึ้นรูป (Strain rate) อุณหภูมิหรือสารหล่อลื่น ในส่วนของข้อเสียของการทดสอบแบบนี้คือ ไม่มีทฤษฎีของความสัมพันธ์ระหว่างค่าที่ได้จากการวัดและค่าสัมประสิทธิ์ความเสียหายมารองรับโดยตรง ได้มีผู้ทดสอบโดยใช้วิธีการ Slab method มาคำนวณความสัมพันธ์ แต่มีความเชื่อถือได้น้อยเพราะไม่ได้คิดอิทธิพลของการเปลี่ยนรูปที่เป็นจริงของวัสดุคือ วัสดุจะเปลี่ยนรูปแบบไม่เท่ากันทุกทิศทุกทาง (Anisotropy) แต่ถึงอย่างไรก็ตามวิธีการนี้ก็ได้รับการยอมรับอย่างกว้างขวางและเป็นวิธีตรวจสอบความเสียหายที่ใช้กันแพร่หลายที่สุดวิธีหนึ่ง

หลักการที่ใช้ในการทดสอบเพื่อหาค่าความเสียหายภายใต้ช่วงการเปลี่ยนรูปถาวร (Plastic deformation) ของชิ้นทดสอบคือ การหาขนาดความสูงและขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในของชิ้นทดสอบที่เปลี่ยนไป เมื่อนำชิ้นทดสอบรูปวงแหวนมากดบนแม่พิมพ์แผ่นราบที่มีค่าความแข็ง ชนิดของวัสดุชิ้นทดสอบและค่าความหยาบผิวเหมือนแม่พิมพ์จริง เพื่อให้ได้อัตราส่วนของความสูงลดลงประมาณ 50% โดยมีขนาดของวงแหวนในอัตราส่วน $D_0 : D_f : t$ เท่ากับ 6 : 3 : 2 ขณะทำการขึ้นรูปการกดชิ้นทดสอบ ทิศทางของแรงกดจะอยู่ในแนวตั้งฉากกับผิวชิ้นทดสอบ ทำให้ชิ้นทดสอบเกิดการไหลตัวในทิศทางขนานกับผิวแม่พิมพ์ ถ้าเราสังเกตที่เส้นผ่านศูนย์กลางภายในของชิ้นทดสอบที่อาจจะเพิ่มขึ้นหรือลดลง ซึ่งจะขึ้นอยู่กับค่าสัมประสิทธิ์ความเสียหายที่เกิดขึ้นระหว่างผิวชิ้นทดสอบกับผิวแม่พิมพ์ โดยการเปลี่ยนรูปของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในของชิ้นทดสอบมีอยู่ 2 ลักษณะคือ

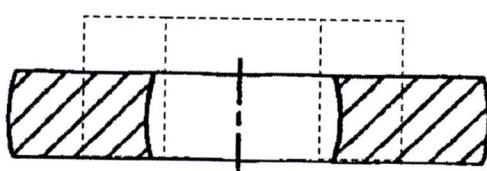
1. ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในเพิ่มขึ้น แสดงว่าสัมประสิทธิ์ความเสียหายมีค่าน้อย เมื่อวงแหวนเกิดการไหลตัวตามแรงเฉือนที่เกิดขึ้น แต่ความเสียหายที่เกิดขึ้นมีค่าน้อย จึงไม่เกิดการหดตัวกลับของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน ดังนั้นขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในจึงมีค่าเพิ่มขึ้น

2. ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในลดลง แสดงว่าสัมประสิทธิ์ความเสียหายมีค่ามาก เมื่อวงแหวนเกิดการไหลตัวตามแรงเฉือนที่เกิดขึ้น อัตราการขยายตัวของวงแหวนจะเริ่มลดลงเนื่องจากความเสียหายที่มีมากพอที่จะทำให้เกิดการหดตัวของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในของชิ้นทดสอบ ดังนั้นขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในจึงมีค่าลดลง

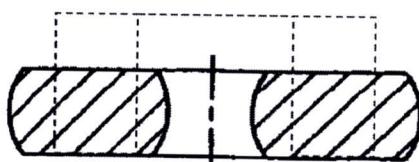


$$D_o : D_i : H = 6 : 3 : 2$$

ก.) วงแหวนก่อนการทดสอบ



ข) การเปลี่ยนรูปเนื่องจากความเค้นทานต่ำ



ค) การเปลี่ยนรูปเนื่องจากความเค้นทานสูง

รูปที่ 2.25 แสดงลักษณะการเปลี่ยนรูปของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในหลังการทดสอบ [24]

วิธีหาค่าสัมประสิทธิ์ความเสียหายจากการทดสอบแรงอัดขึ้นทดสอบรูปวงแหวน (Ring compression test) โดยใช้สารหล่อลื่นระหว่างชิ้นงานกับแม่พิมพ์ โดยอาศัยกฎของคูลอมบ์ตามทฤษฎีของแมลล์และค็อกคร็อพ (Male and Cockcroft) สามารถหาได้ตามขั้นตอนดังนี้

1. หาเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในของชิ้นทดสอบสามารถหาได้ดังนี้

$$\% \text{Reduction in internal diameter} = \frac{d_0 - d_1}{d_0} \times 100$$

เมื่อ d_0 = ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในก่อนทดสอบ

d_1 = ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในหลังทดสอบ

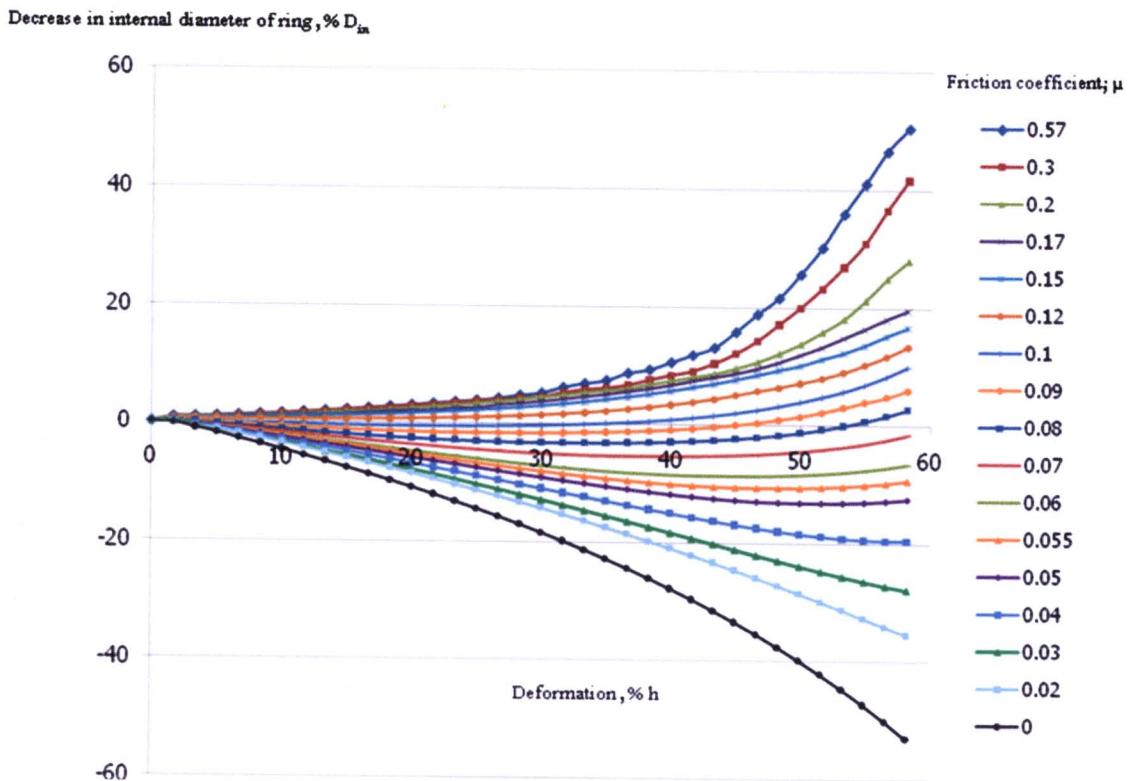
2. หาเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงความสูงของชิ้นทดสอบสามารถหาได้ดังนี้

$$\% \text{Reduction in height} = \frac{h_0 - h_1}{h_0} \times 100$$

เมื่อ h_0 = ขนาดความสูงของชิ้นทดสอบก่อนกดทดสอบ

h_1 = ขนาดความสูงของชิ้นทดสอบหลังกดทดสอบ

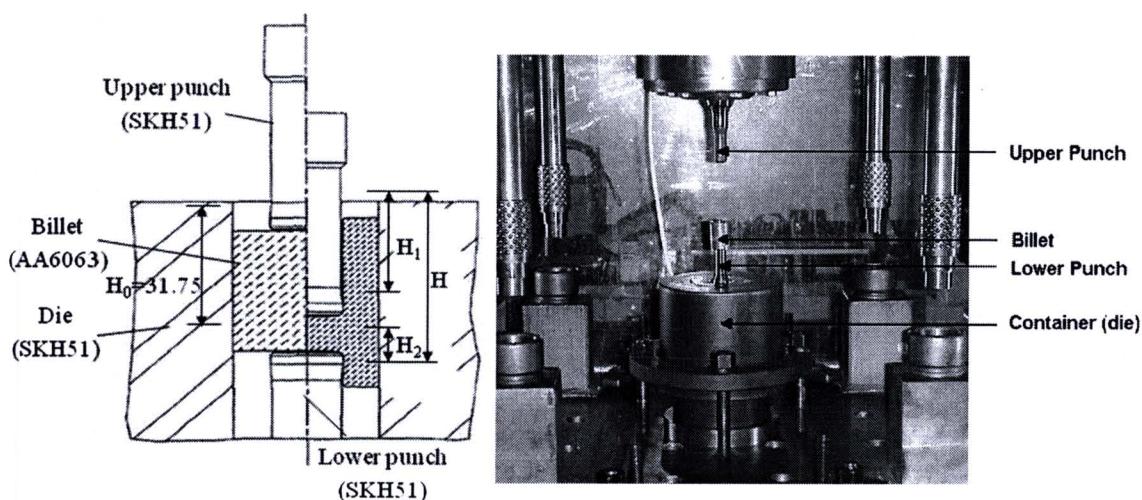
3. นำค่าเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในและค่าเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงความสูงของชิ้นทดสอบไปอ่านค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน (μ) ได้จากกราฟ Calibration curve ที่จัดทำขึ้นจากการจำลอง Finite Element Simulation



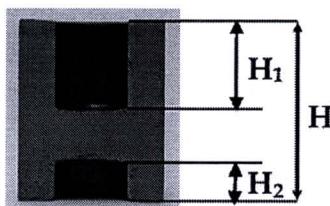
รูปที่ 2.26 กราฟ Calibration curve ของการทดสอบ Ring compression test สำหรับวัสดุอลูมิเนียมเกรด AA6063

2.4.2 วิธีการทดสอบแบบ Double cup extrusion test [2, 7]

การทดสอบ Double cup extrusion test เป็นการทดสอบที่มีทั้งกระบวนการ Forward and Backward extrusion ซึ่งจะได้ชิ้นงานดังรูป 2.28 โดยค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานนั้นจะหาจากอัตราส่วนของความสูงของถ้วย (H_1/H_2) ที่ได้จากการขึ้นรูป ซึ่งอัตราส่วนของความสูงถ้วยจะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานคือ ถ้าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานมากก็จะได้อัตราส่วนความสูงถ้วยมาก ถ้าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานน้อยก็จะได้อัตราส่วนความสูงถ้วยน้อย และถ้าไม่มีค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานอัตราส่วนความสูงของถ้วยจะเท่ากับหนึ่ง ดังนั้นอัตราส่วนความสูงของถ้วยจึงสามารถใช้ในการประเมินค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานได้ สำหรับแม่พิมพ์ Double cup extrusion test จะทำการทดสอบโดยการใส่ชิ้นงาน (Billet) ลงใน Die insert โดยมี Upper Punch ทำหน้าที่เคลื่อนที่ดันกดชิ้นงานและมี Container ช่วยในการรับแรงอีกที ด้านล่างของชุดแม่พิมพ์จะมี Lower punch ซึ่งอยู่กับที่เป็นตัวรองรับชิ้นงานอยู่ โดยขนาดของ Upper Punch และ Lower punch จะมีขนาดเท่ากัน เมื่อได้ชิ้นงานมาแล้วจะนำอัตราส่วนความสูงของถ้วยมาเทียบกับ Calibration curve ที่ได้จากการจำลอง Finite Element Simulation เพื่ออ่านค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานที่เกิดขึ้นขณะทำการทดสอบ



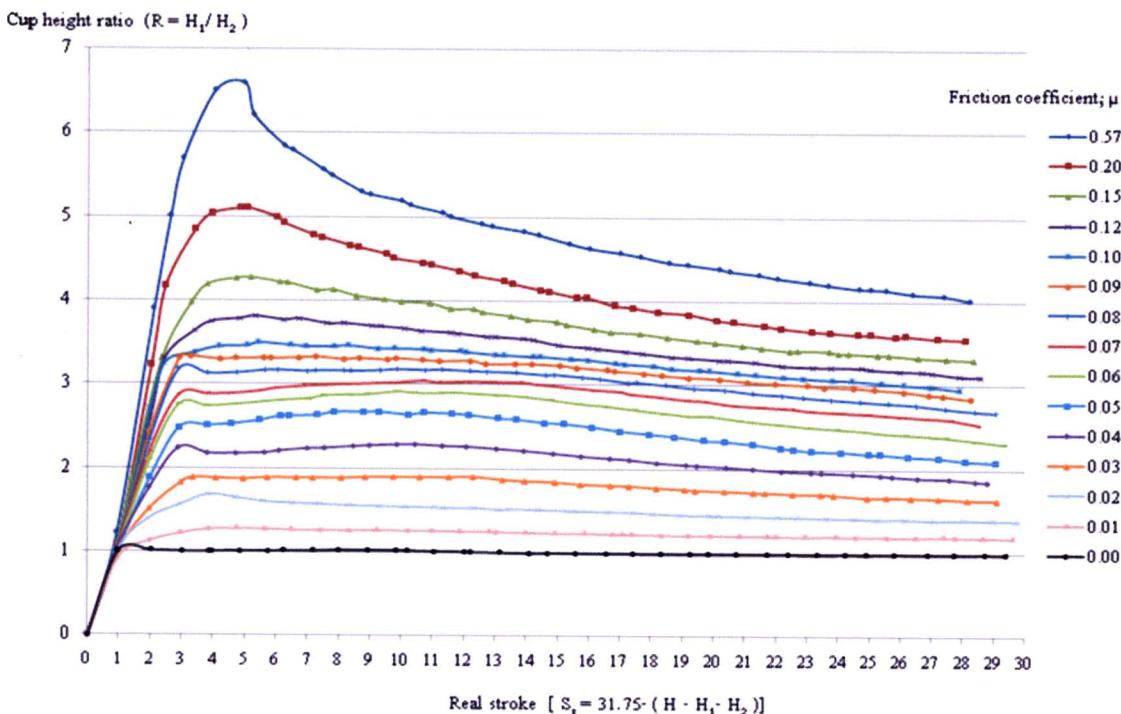
รูปที่ 2.27 แสดงเครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบ Double cup extrusion test [1, 4]



รูปที่ 2.28 แสดงลักษณะของชิ้นงานที่ได้จากการทดสอบ Double cup extrusion test

การคำนวณ

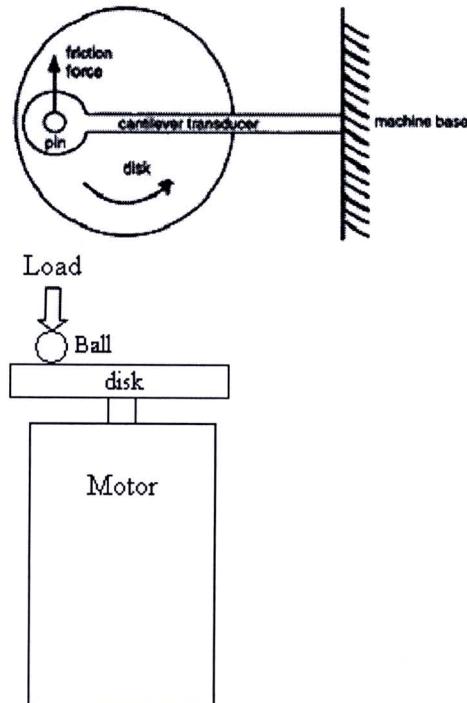
- Cup height ratio $R = H_1 / H_2$
- Real stroke $S_r = 31.75 - (H - H_1 - H_2)$



รูปที่ 2.29 กราฟ Calibration curve ของการทดสอบ Double cup extrusion test สำหรับวัสดุอะลูมิเนียมเกรด AA6063

2.4.3 วิธีการทดสอบแบบ Ball on disc

การทดสอบ Ball on disc เป็นที่นิยมใช้ในห้องทดสอบมากที่สุด เนื่องจากสะดวกในการทดสอบและข้อมูลที่ได้ออกมานำมาหาค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานได้อย่างรวดเร็ว สามารถปรับแรงกด ความเร็ว และเวลาในการทดสอบให้เหมาะสมกับวัสดุที่นำมาทดสอบได้ง่าย หลักการคือชิ้นทดสอบที่เป็นลูกบอลจะถูกยึดจับไว้กับแท่งทดสอบ คาน และค้อนน้ำหนัก เมื่อแผ่นจานหมุนได้รับแรงขับจากมอเตอร์ ค้อนน้ำหนักที่มีแรงกดไปที่จานหมุน จนเกิดแรงเสียดทานด้านการไถลของแท่งทดสอบบนจาน แรงที่กระทำกลับต่อคานจะถูกแปลงเป็นสัญญาณส่งผ่านให้โปรแกรมคำนวณแล้วแสดงผลออกมาเป็นค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน ณ เวลาใดๆ ซึ่งจะต้องนำกราฟผลการทดสอบนี้ไปวิเคราะห์หาค่าที่เหมาะสมที่แสดงถึงความเสียดทานที่เกิดขึ้นเนื่องจากผิวสัมผัสทั้งสองนั้นอย่างแท้จริง กลไกการทำงานแสดงในรูปที่ 2.30



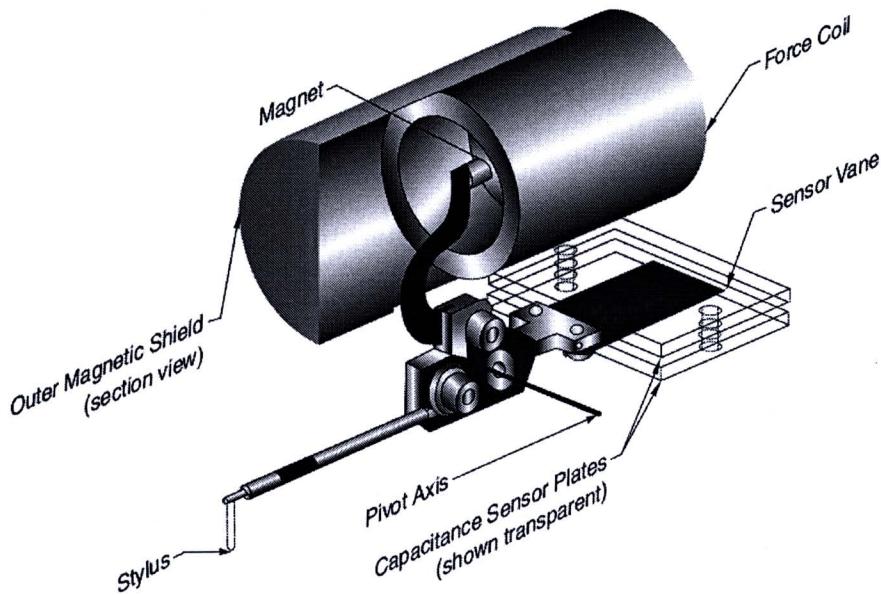
รูปที่ 2.30 กลไกการทำงานของเครื่องทดสอบ Ball on disc [7]

2.5 ความหยาบผิวและวิธีการวัดความหยาบผิว [11]

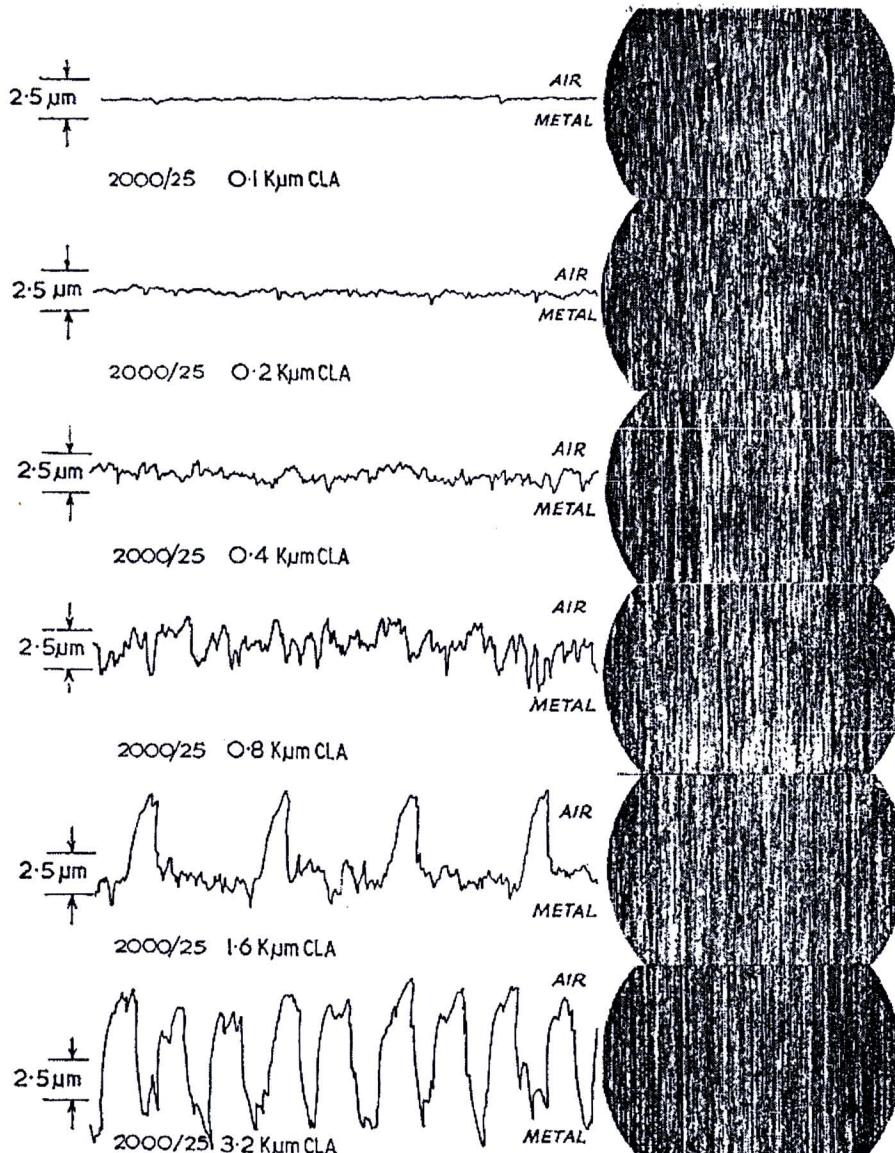
ก่อนที่จะสามารถวัดค่าออกมาได้จำเป็นที่จะต้องให้คำจำกัดความของส่วนที่จะถูกวัดเสียก่อน ในกรณีของความหยาบ ความละเอียดของผิวแล้ว คำจำกัดความต่างๆมักจะแสดงให้เห็นถึงความไม่ถูกต้องที่เกิดเนื่องจากแหล่งที่ต่างกัน เนื่องจากสภาพรูปร่างพื้นผิวจริงจะรวมเอาค่าความเป็นคลื่น (Waviness) ซึ่งเป็นความคลาดเคลื่อนของรูปร่างอันเนื่องมาจากความไม่ถูกต้องทางเรขาคณิตของวิธีการผลิตผิวหน้ากับความหยาบ (Roughness) ซึ่งเป็นความไม่สม่ำเสมอหรือความไม่ถูกต้องที่ไม่สามารถหลีกเลี่ยงได้ของกรรมวิธีการผลิตผิวหน้าไว้ด้วยกันถ้ากระทำการบนเครื่องจักรที่สมบูรณ์ทุกประการหนึ่งในปัญหาหลายๆอย่างของการวัดความหยาบของผิวหน้าก็คือ การแยกความเป็นคลื่นออกจากความหยาบ ถ้าจำกัดการตรวจสอบของผิวหน้าที่ถูกตกแต่งมาเป็นช่วงความยาวหนึ่ง ซึ่งไม่นับความยาวคลื่นที่ยาว ดังนั้นจะมีเฉพาะความหยาบเท่านั้นที่ถูกรวมเข้ามา ความยาวคลื่นสูงสุดที่ถูกพิจารณาเราเรียกว่าความยาวคลื่นตัดออก (Cut-off wavelength) ซึ่งกำหนดเป็นมาตรฐานในสหราชอาณาจักร โดย B.S 1134 ให้เท่ากับ 0.25 mm 0.8 mm และ 2.5 mm การเลือกใช้ค่าเหล่านี้จะขึ้นอยู่กับผิวหน้าที่จะทำการตรวจสอบ สำหรับผิวหน้าที่ผ่ายการเจียรนัย ความยาวคลื่นตัดออกที่ใช้จะเป็น 0.8 mm ถ้าสำหรับชิ้นงานที่มีขนาดสั้นๆ ก็จะใช้ขนาด 0.25 มม. จึงจะเหมาะสม กฎทั่วไปสำหรับการทำผิวหน้า คือความยาวคลื่นตัดออกควรเพิ่มขึ้นตามอัตราเร็วของการตัด

2.5.1 วิธีการของการวัดความหยาบผิว

วิธีที่สามารถใช้ได้ผลสำหรับการวัดความหยาบของผิวชิ้นงานที่ผ่านการตกแต่งมาอาจจะใช้วิธีการเปรียบเทียบหรือใช้วิธีการวัดโดยตรง วิธีการวัดเปรียบเทียบนี้เป็นวิธีการที่จะตรวจสอบความหยาบของผิวโดยการสังเกตหรือใช้ความรู้สึกบนผิวหน้าที่จะทำการตรวจสอบนั้น การเปรียบเทียบนี้ก็อาจจะทำให้เกิดการอ่านผิดขึ้นได้ ถ้าการเปรียบเทียบไม่ได้ใช้ชิ้นงานที่ทำหรือผลิตด้วยเทคนิคเดียวกัน รอยที่ปรากฏขึ้นบนผิวหน้าจะขึ้นอยู่กับแบบของเครื่องมือที่ใช้ในทิศทางของการขีดข่วนหรือตกแต่งผิวหน้าและขึ้นกับความลึกของรอยที่เกิดขึ้นด้วย ซึ่งรอยที่ปรากฏเหล่านี้สามารถที่จะตรวจสอบได้โดยการใช้อุปกรณ์ส่งขยายดู ดังจะแสดงในรูปที่ 2.32 ซึ่งแสดงภาพขยายที่เห็นจากกล้องขยายของผิวหน้าที่แตกต่างกัน 6 ผิวหน้า และผิวหน้าที่เป็นด้านข้าง (Profile) ของผิวหน้าเหล่านั้น การแตะสัมผัสเป็นวิธีการที่ให้ผลดีในการกำหนดความหยาบของผิวมากกว่าการสังเกตด้วยตา ซึ่งอาจทำให้อ่านค่าผิดพลาดได้และการเปรียบเทียบควรจะใช้กับผิวหน้าที่มีการผลิตเหมือนกันเท่านั้น ซึ่งก็ได้มีหลายบริษัทที่ได้สร้างขึ้นส่วนมาตรฐาน สำหรับการเปรียบเทียบความหยาบของผิวแต่ละวิธีการผลิต ซึ่งเราสามารถที่จะเลือกใช้ทำการตรวจสอบได้อย่างสะดวก ส่วนวิธีการตรวจสอบโดยตรงนั้นได้มีการพัฒนาขึ้นอย่างมากเพื่อให้สามารถอ่านค่าออกมาได้ เมื่อวางลงบนผิวหน้าที่จะตรวจความหยาบของผิวซึ่งส่วนมากจะใช้เครื่องวัดแบบใช้หัวลาก



รูปที่ 2.31 เครื่องวัดความหยาบผิวแบบเข็มลาก (Stylus measurement head with loading system)[11]



รูปที่ 2.32 สภาพผิวหน้าที่มองเห็นคล้าย ๆ กันแต่ความหยาบผิวต่างกัน [12]

2.5.2 เครื่องมือวัดความหยาบผิวแบบเข็มลาก (Stylus measurement)

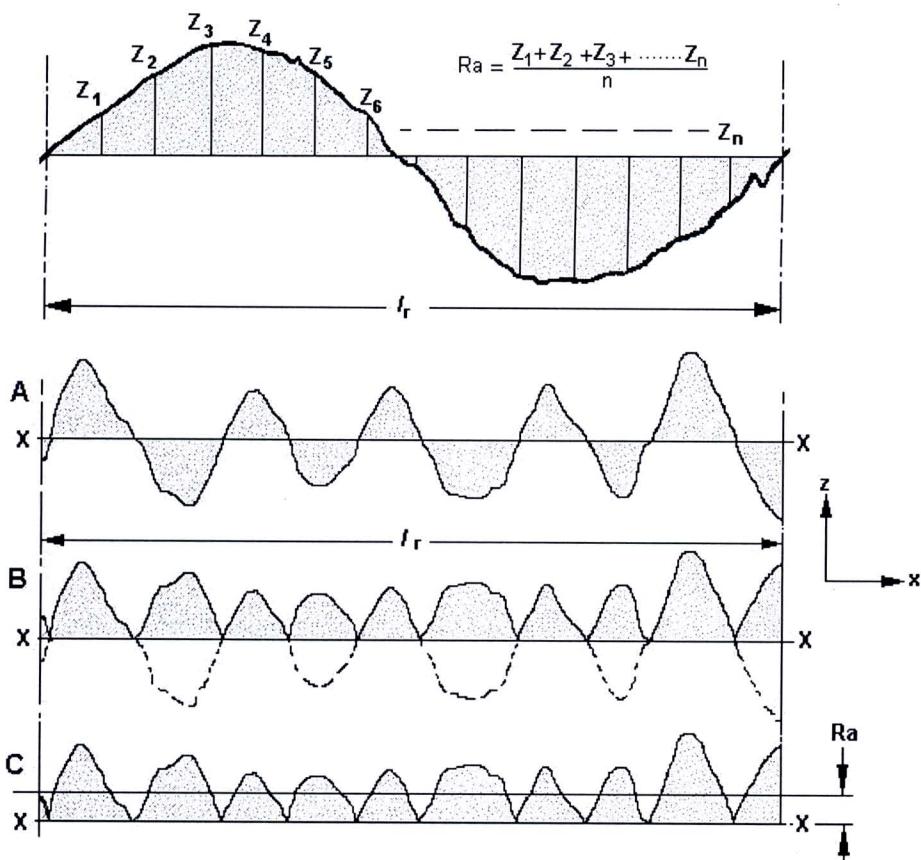
ในทุก ๆ กรณีของเครื่องมือวัดชนิดนี้ สามารถที่จะกล่าวได้ว่ามีวิธีการทำงานดังต่อไปนี้

- ก้านลื่นไถล (Skid) เคลื่อนตัวอย่างช้า เหมือนผิวหน้าที่จะทำการวัดและตามความสูงต่ำของผิวหน้า
- เข็มลาก (Stylus) ซึ่งเคลื่อนที่เหนือผิวหน้านั้นกับก้านลื่นไถลจะสัมผัสทางแนวตั้งกับก้านลื่นไถล อันเนื่องมาจากความหยาบของผิวหน้านั้น
- เครื่องขยายสัญญาณจะขยายสัญญาณจากการเคลื่อนที่ของเข็มลาก
- เครื่องจดบันทึกจะทำการให้ผล โดยการลาดเส้นหรือบันทึกกรุปด้านข้าง (Profile) ของผิวหน้านั้น

2.5.3 การวิเคราะห์รอยลากของผิวหน้า [11]

รอยลากผิวหน้าที่อ่านได้จากเครื่องมือวัดจะต้องนำมาวิเคราะห์เป็นค่าพารามิเตอร์เพื่อที่จะนำค่านี้ไปแสดงค่าประมาณการให้เห็นถึงสภาพผิวโดยรวมทั้งหมด ซึ่งพารามิเตอร์ที่ใช้กันอย่างกว้างขวางในการวิเคราะห์ความเรียบผิวมีดังนี้

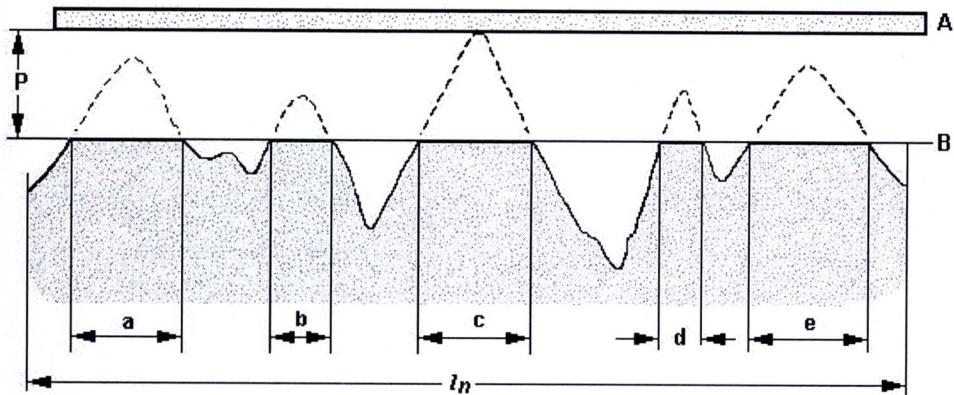
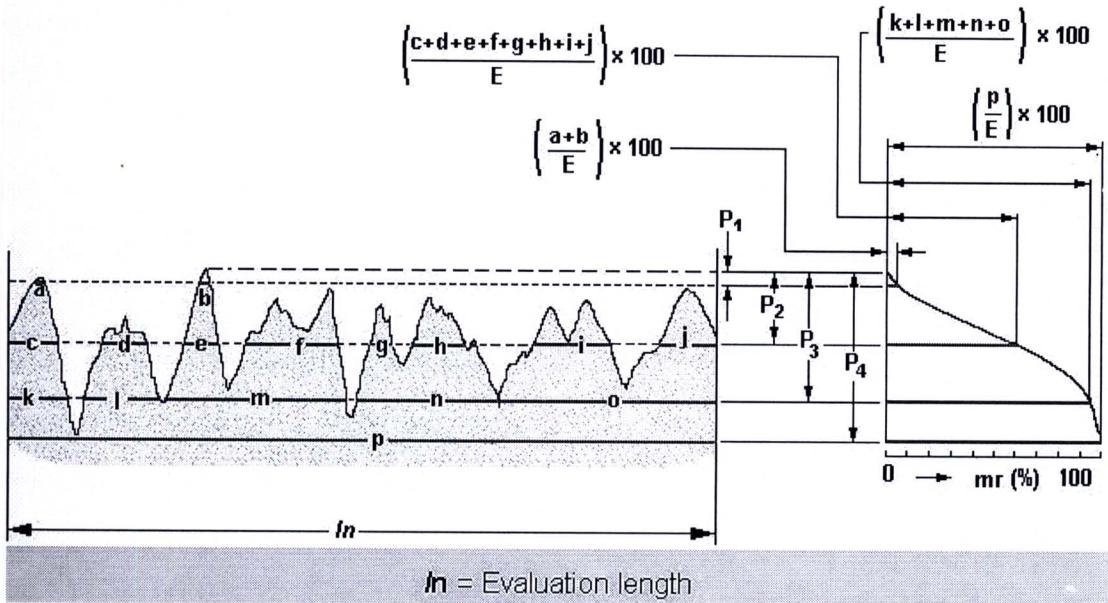
2.5.3.1 Arithmetical Mean Roughness; Ra หมายถึง ค่าความหยาบผิวที่หาได้จากการรวมพื้นที่ยอดแหลมของคลื่นเหนือเส้นกึ่งกลางกับพื้นที่ยอดแหลมของคลื่นใต้เส้นกึ่งกลาง แล้วหารด้วยความยาวเฉลี่ย (l_r) โดยที่ค่าของ Ra มีหน่วยวัดเป็นไมโครเมตร



รูปที่ 2.33 ลักษณะการวิเคราะห์ของค่า Arithmetical Mean Roughness (Ra)

2.5.3.1 Material ratio of the profile (Abbott Firestone curve); Rmr(c) [11, 13] หรือ Bearing ratio เป็นอัตราส่วนของระยะที่พื้นที่สัมผัสจริงของ Surface profile ที่สัมผัสกับเส้น Parallel line (Bearing line) ต่อระยะความยาวทั้งหมดของ Surface profile ซึ่งเป็นเส้นที่ลากมาจากเส้นอ้างอิง หรือ Mean line ถ้า Parallel line อยู่ที่ตำแหน่งต่ำสุดของ peak ใน Surface profile ค่า Rmr(c) จะมีค่า

เท่ากับ 100% แต่ถ้า Parallel line อยู่ที่ตำแหน่งสูงสุดของ peak ใน Surface profile ค่า Rmr(c) จะมีค่าเท่ากับ 0% ซึ่งค่าดังกล่าวจะแสดงให้เห็นได้ว่า ถ้าค่า Rmr(c) มีค่าน้อยแสดงว่า ณ ตำแหน่งที่เส้น Parallel line ลากผ่านนั้นมีปริมาณของเนื้อของวัสดุอยู่น้อย ถ้าค่า Rmr(c) มีค่ามากแสดงว่า ณ ตำแหน่งที่เส้น Parallel line ลากผ่านนั้นมีปริมาณของเนื้อของวัสดุอยู่มาก



$$\text{Material Ratio} = \frac{a+b+c+d+e}{l_n} \times 100\%$$

A = Lapping plate B = Bearing line l_n = Evaluation length

รูปที่ 2.34 ลักษณะการวิเคราะห์หาค่า Material ratio of the profile (Abbott Firestone curve); Rmr(c)

2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.6.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการทดสอบ Double cup extrusion test

สารหล่อลื่นสำหรับอลูมิเนียมในกระบวนการทาบขึ้นรูปเย็นนั้นเป็นสิ่งที่สำคัญมากเพราะอลูมิเนียมจะเกิดการสึกหรอแบบยึดติด (Adhesion) กับแม่พิมพ์สูงมาก ซึ่งจะส่งผลกระทบต่อคุณภาพของชิ้นงานที่ได้ และทำให้การผลิตต้องเกิดการหยุดชะงักลง (Breakdown) การประเมินสารหล่อลื่นจึงเป็นสิ่งสำคัญเพื่อที่จะทำให้ได้ทราบถึงความสามารถในการไหลตัวของสารหล่อลื่นและปริมาณที่พอเหมาะในการใช้สารหล่อลื่นแต่ละชนิด เพื่อให้ได้ชิ้นงานที่มีคุณภาพและป้องกันการหยุดชะงักของกระบวนการผลิต (Breakdown) [3] การทดสอบ Double cup extrusion เป็นวิธีการประเมินสารหล่อลื่นที่ใช้กันอย่างกว้างขวางในกระบวนการทาบขึ้นรูปเย็นเพราะการทดสอบ Double cup extrusion นี้มีความถูกต้องเปรียบเสมือนการขึ้นรูปชิ้นงานจริง ทั้งในเรื่องความรุนแรงขณะทำการขึ้นรูป ความดัน และการขยายตัวของพื้นผิววัสดุชิ้นงาน (Surface expansion) [16] โดย Armin Buschhausen และคณะ [14] ได้ทำการศึกษาสารหล่อลื่นโดยกระบวนการทดสอบ Double cup extrusion และใช้การจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ด้วยโปรแกรมที่มีชื่อว่า DEFORM ช่วยในการทดสอบพบว่า Cup height ratio (H_1/H_2) ของชิ้นงานที่ได้จากการทดสอบ Double cup extrusion ขึ้นอยู่กับ Reduction ratio และค่า Friction factor (m) ที่ใช้ในการขึ้นรูป ถ้า Reduction ratio ลดลงจะทำให้ค่า Cup height ratio เพิ่มมากขึ้น และค่า Friction factor (m) ที่เพิ่มมากขึ้นก็จะทำให้ค่า Cup height ratio เพิ่มมากขึ้นเช่นกัน ในปีต่อมา M.I. Ghobrial และคณะ [15] ได้ทำการศึกษาการขยายตัวของวัสดุชิ้นงานทดสอบด้วยวิธี Double cup extrusion โดยใช้การจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ด้วยโปรแกรมที่มีชื่อว่า DEFORM พบว่าความเครียด (Strain) เกิดมากที่สุดที่มุมของพื้นที่ด้านบน (Upper punch) และ พื้นที่ด้านล่าง (Lower punch) และค่า Reduction in area ขึ้นอยู่กับปริมาณของค่า Friction factor (m) ถ้ามีค่า Friction factor (m) ต่ำ ก็จะส่งผลให้มี Reduction in area สูง ต่อมา Timothy Schrader และคณะ [16] ได้ทำการศึกษาวิธีการออกแบบลักษณะของแม่พิมพ์ Double cup extrusion ให้มีความรุนแรงขณะการขึ้นรูป ความดัน และการขยายตัวของพื้นผิววัสดุชิ้นงาน (Surface expansion) เปรียบเสมือนการปฏิบัติจริงในงานทาบขึ้นรูปเย็นมากขึ้นพบว่าความดัน ในการทดสอบจะเพิ่มขึ้นเมื่อ Extrusion ratio ในการทดสอบเพิ่มมากขึ้น อีกทั้งยังขึ้นอยู่กับสมบัติของวัสดุคือ ค่า Strain hardening exponent ของวัสดุลดลงและ ค่า Strength coefficient ของวัสดุเพิ่มมากขึ้นก็จะทำให้ความดันเพิ่มมากขึ้นด้วยเช่นกัน ส่วน Surface expansion นั้นจะเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มค่า Extrusion ratio ในการทดสอบ และในปีเดียวกัน Mark Gariety และคณะ [17] ได้ทำการประเมินสารหล่อลื่นต่างๆคือ MEC Homat, Daido Aqualub และ MCI Z-Coat เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพกับ Zinc phosphate coating โดยใช้วิธีการทดสอบ Double cup extrusion เพื่อหาสารหล่อลื่นที่มีประสิทธิภาพเทียบเคียงหรือดีกว่า Zinc phosphate coating เพราะ Zinc phosphate coating นั้นมีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม พบว่าทั้ง MEC Homat และ Daio Aqualub นั้นให้

ค่า Friction factor (m) ต่ำกว่า Zinc phosphate coating โดย MEC Homat ให้ค่า Friction factor (m) ต่ำที่สุด ในปีต่อๆมาได้มีการหาวิธีการเคลือบสารหล่อลื่นแบบต่างๆเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการหล่อลื่น เพราะเรื่องของผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมของ Zinc phosphate coating โดย M. Arentoft และคณะ [18] ได้ทำการศึกษาการทำผิววัสดุชิ้นงานให้มีรูพรุนเพื่อกักเก็บสารหล่อลื่นก่อนทำการขึ้นรูปเพื่อเปรียบเทียบกับการใช้ Zinc phosphate coating ในการหล่อลื่นโดยใช้การทดสอบ Double cup extrusion ร่วมในการทดสอบกับ Ring compression test และ Single cup extrusion พบว่า ชิ้นงานที่ทำให้เกิดรูพรุนแล้วเคลือบด้วย Molykote นั้นมีคุณภาพของผิวชิ้นงานหลังการทดสอบที่ดีกว่าชิ้นงานที่หล่อลื่นด้วย Zinc phosphate coating ส่วนในกรณีของการทดสอบที่มี Punch stroke (z/h_0) สูงๆ ชิ้นงานที่ทำให้มีรูพรุนแล้วเคลือบด้วย Soap นั้นมีคุณภาพของผิวชิ้นงานหลังการทดสอบที่ดีกว่าการหล่อลื่นด้วย Zinc phosphate coating

จากงานวิจัยดังกล่าว แสดงให้เห็นถึงข้อดีของการใช้การทดสอบแบบ Double cup extrusion test ที่มีความรุนแรงในการขึ้นรูป ความดัน และ Surface expansion เสมือนงานจริง ดังนั้นทางผู้วิจัยจึงได้นำการทดสอบแบบ Double cup extrusion มาเป็นวิธีหนึ่งที่ใช้ในการทดสอบสารหล่อลื่นของงานวิจัยในครั้งนี้

2.6.2 งานวิจัยที่เกี่ยวกับการใช้ Finite element simulation ในการจัดทำ Calibration curve

Calibration curve เป็นกราฟที่ใช้ในการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานที่ได้จากการทดสอบ Ring compression test และ Double cup extrusion test โดยในการทดสอบ Ring compression test นั้น R.E. Dutton และคณะ [19] ได้ใช้ Finite element simulation ชื่อ โปรแกรม DEFORM ในการจัดทำ Calibration curve ของการทดสอบ Ring compression test ส่วนในการทดสอบ Double cup extrusion test นั้น Timothy Schrader และคณะ [16], Mark Gariety และคณะ [17] ได้ใช้ Finite element simulation ชื่อ โปรแกรม DEFORM ในการจัดทำ Calibration curve ของการทดสอบ Double cup extrusion test เช่นเดียวกัน

ซึ่งวัสดุต่างชนิดกันจะมีสมบัติที่แตกต่างกัน เป็นผลให้ Calibration curve ของวัสดุต่างชนิดกันจึงไม่สามารถใช้ร่วมกันได้ ดังนั้นงานวิจัยในครั้งนี้จึงต้องจัดทำ Calibration curve ของวัสดุอลูมิเนียมเกรด AA6063 ของทั้งการทดสอบ Ring compression test และ Double cup extrusion test ขึ้นมาเพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานที่ได้จากการทดสอบ โดยใช้ Finite element simulation ชื่อ โปรแกรม DEFORM-3D

2.6.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับสารหล่อลื่นที่ใช้ในงานทอขึ้นรูปเย็น (Cold forging)

สำหรับสารหล่อลื่นที่นิยมใช้ในงานทอขึ้นรูปเย็น (Cold forging) ซึ่งงานอลูมิเนียมนั้นมีอยู่ 3 ประเภท คือ Soap phosphate coating, Soap aluminum fluoride coating, และ Calcium aluminate coating ซึ่งในการใช้ Soap phosphate coating เป็นสารหล่อลื่นนั้นได้รับความนิยมที่สุด ส่วน Soap aluminum fluoride coating และ Calcium aluminate coating นิยมใช้กันมาในญี่ปุ่นและยุโรปตามลำดับ [9]

โดยในปี 1999 L.Lazzarotto และคณะ [20] ได้ทำการศึกษาพารามิเตอร์ต่างๆ ในกระบวนการผลิตและเคลือบ Zinc phosphate stearate coating ที่ส่งผลต่อคุณภาพและประสิทธิภาพของ Zinc phosphate stearate coating ซึ่งพบว่าความเข้มข้นของสารเคมีและเวลาในการจุ่มแช่ชิ้นงานในสารเคมีมีผลต่อขนาดของเกรนและปริมาณผลึกของการหล่อลื่น จากนั้นในปีต่อๆมาก็ได้มีการทดสอบโดยนำ Zinc phosphate coating มาเปรียบเทียบกับสารหล่อลื่นชนิดอื่นๆ โดย Liqun Ruan และคณะ [21] ได้ทำการทดสอบ Localised rod-drawing test เพื่อศึกษา Surface expansion, interface temperature, sliding velocity และ pressure โดยใช้ zinc phosphate, sodium stearate และ zinc stearate เป็นสารหล่อลื่น จากนั้น Mark Gariety และคณะ [17] ได้ทำการประเมินสารหล่อลื่นต่างๆคือ MEC Homat, Daido Aqualub และ MCI Z-Coat เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพกับ Zinc phosphate coating โดยใช้วิธีการทดสอบ Double cup extrusion เพื่อหาสารหล่อลื่นที่มีประสิทธิภาพเทียบเคียงหรือดีกว่า Zinc phosphate coating ส่วน Gracious Ngaile และคณะ [22] ได้ทำการทดสอบ Tribo-testing เพื่อคุณสมบัติทางด้าน Surface expansion เมื่อใช้สารหล่อลื่นประเภทต่างๆ ซึ่งพบว่า Calcium and sodium soap ให้ประสิทธิภาพเทียบเคียงกับ Zinc phosphate coating และในปี 2009 M.C.M.Farias และคณะ [23] ได้ทำการทดสอบ Sliding wear test ด้วยการทดสอบ ball on disc เพื่อเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานของเหล็กคาร์บอนต่ำ AISI 1006 แบบไม่ใช้สารหล่อลื่นเทียบกับการใช้ Sodium stearate soap, sodium soap และ zinc phosphate เป็นสารหล่อลื่น และในปีเดียวกัน M.Arentoft และคณะ [18] ได้ทำการเพิ่มประสิทธิภาพของสารหล่อลื่น (Phosphate coating and soap) โดยการเคลือบสารหล่อลื่นลงบนผิวชิ้นงานเริ่มต้นที่มีรูพรุน

ซึ่งจากงานวิจัยดังกล่าวข้างต้นจะเห็นได้ว่า Soap phosphate coating ได้มีงานวิจัยต่างๆมากมาย แต่ Soap aluminum fluoride coating ซึ่งเป็นสารหล่อลื่นประเภทเดียวกันกับ Soap phosphate coating [9] ยังไม่มีการทดสอบเลย อีกทั้งทางบริษัทไทยปาร์เกอร์ไรซิงได้ใช้ Soap aluminum fluoride coating เป็นสารหล่อลื่นในการเคลือบชิ้นงานสำหรับงานทอขึ้นรูปเย็นชิ้นส่วนอลูมิเนียม ดังนั้นงานวิจัยในครั้งนี้จึงได้ทำการทดสอบโดยใช้ Soap aluminum fluoride coating เปรียบเทียบกับการใช้ Soap phosphate coating เป็นสารหล่อลื่นในการทดสอบต่างๆ