

## บทที่ 3

### กระบวนการประกอบหัวอ่าน/เขียนสำเร็จ และทฤษฎี

#### 3.1 บทนำ

ปัจจุบันอุตสาหกรรมต่างๆ ที่เกี่ยวกับการประกอบชิ้นส่วน มีการนำกระบวนการสเวจ (Swaging Process) มาใช้เป็นส่วนหนึ่งของกระบวนการผลิต เพื่อช่วยให้สมรรถนะของการผลิตสูงขึ้น ซึ่งกระบวนการสเวจ คือ กระบวนการบีบหรืออัดให้วัสดุมีการเปลี่ยนรูป เพื่อให้วัสดุมีการยึดติดกัน โดยมีข้อดี ดังนี้

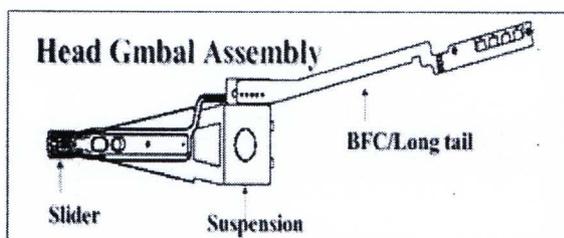
- ประหยัดเวลา เนื่องจากผิวของชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการสเวจ มีคุณภาพดี ไม่ทำให้ผิวของชิ้นงานเปลี่ยนสภาพ จึงไม่ต้องมาเสียเวลาแต่งผิวและรูปร่างของชิ้นงาน และยังมีระยะเวลาในการประกอบชิ้นงานที่น้อยกว่าการเชื่อม การติดกาว หรือการใช้สลักเกลียว นอกจากนี้ กระบวนการสเวจ ยังมีการจัดเตรียมอุปกรณ์ต่างๆ ได้ง่าย
- ประหยัดเนื้อวัสดุ เนื่องจากในกระบวนการสเวจ ชิ้นส่วนแต่ละชิ้นจะถูกดันให้ยึดติดกัน จึงไม่ต้องมีการใช้วัสดุเพิ่มเติมในการประกอบชิ้นส่วน เช่น ลวดเชื่อม กาว หรือสลักเกลียว
- ชิ้นงานที่ได้จะมีความแข็งแรงมากขึ้น เนื่องจากโครงสร้างของเกรน (Grain) ในเนื้อวัสดุ จะเรียงตัวใหม่ซึ่งทำให้ชิ้นงานมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น

จากข้อดีข้างต้น ทำให้ผู้ผลิตในปัจจุบันมีการนำกระบวนการสเวจ มาใช้อย่างแพร่หลาย แต่การที่จะได้ชิ้นงานที่มีคุณภาพจากกระบวนการสเวจ จะต้องมีการควบคุมตัวแปรต่างๆ มากมาย ในกระบวนการให้อยู่ในสภาวะที่เหมาะสม เช่น ในปัจจุบันกระบวนการสเวจโดยใช้ลูกบอล (Ball Swaging Process) ยังมีปัญหาในการหาสภาวะที่เหมาะสมของตัวแปร โดยเฉพาะตัวแปรด้านลูกบอลที่ใช้ในกระบวนการ ได้แก่ ขนาด ความเร็ว และทิศทางการยิงลูกบอล เป็นต้น นอกจากนี้ กระบวนการสเวจโดยใช้ลูกบอล แล้วยังมีกระบวนการสเวจ แบบอื่นๆ ด้วย เช่น กระบวนการสเวจแบบหมุน (Rotary Swaging Process) และกระบวนการสเวจแบบใช้การขยายตัวของอุปกรณ์ (Expansion Swaging Process) เป็นต้น

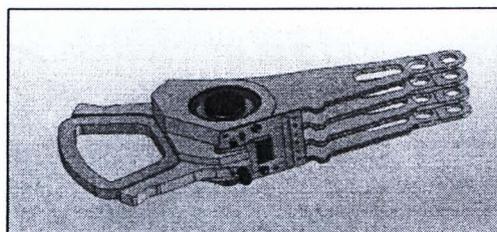
### 3.2 กระบวนการสเวจ (Swaging Process)

#### 3.2.1 กระบวนการประกอบหัวอ่าน/เขียนสำเร็จ โดยใช้ลูกบอล (Ball Swaging Process)

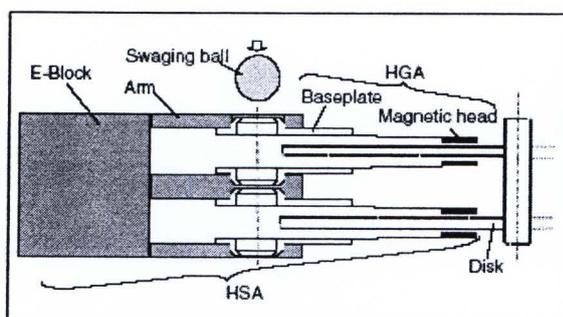
กระบวนการประกอบหัวอ่าน/เขียนสำเร็จชนิดนี้เป็นแบบที่ทำการศึกษา เป็นกระบวนการที่ใช้ลูกบอลทรงกลมที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางใหญ่กว่ารูหรือช่องของชิ้นงานที่จะทำการยึดติดกันเล็กน้อย เมื่อยังลูกบอลผ่านรูก็จะทำให้วัสดุที่อยู่ด้านในมีการขยายตัวเปลี่ยนรูปร่างอย่างถาวรอัดตัวเข้ากับวัสดุที่ล้อมรอบอยู่ด้านนอก เกิดความดันสัมผัสระหว่างผิวของวัสดุทั้งสอง ทำให้วัสดุมีการยึดติดกัน ซึ่งในอุตสาหกรรมประกอบชิ้นส่วนฮาร์ดดิสก์ มีการนำกระบวนการสเวจ โดยใช้ลูกบอล ดังภาพที่ 12 (ก) ในกระบวนการประกอบ หัวอ่าน/เขียนข้อมูล (Head Gimbal Assembly, HGA) ดังภาพที่ 12 (ข) ประกอบเข้ากับ แขนหัวอ่านเขียน (Actuator Arm) ดังภาพที่ 12 (ค) เพื่อให้ได้ ชุดประกอบหัวอ่าน/เขียนสำเร็จ (Head Stack Assembly, HSA) ดังภาพที่ 12 (ง)



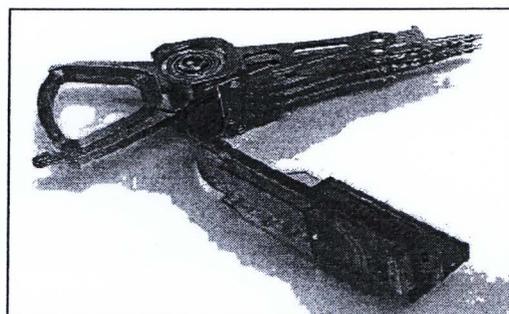
(ก)



(ข)



(ค)



(ง)

ภาพที่ 12 ส่วนประกอบ และลักษณะการยิงลูกบอลในกระบวนการสเวจด้วยลูกบอล

(ก) หัวอ่าน/เขียนข้อมูล (Head Gimbal Assembly, HGA) [4]

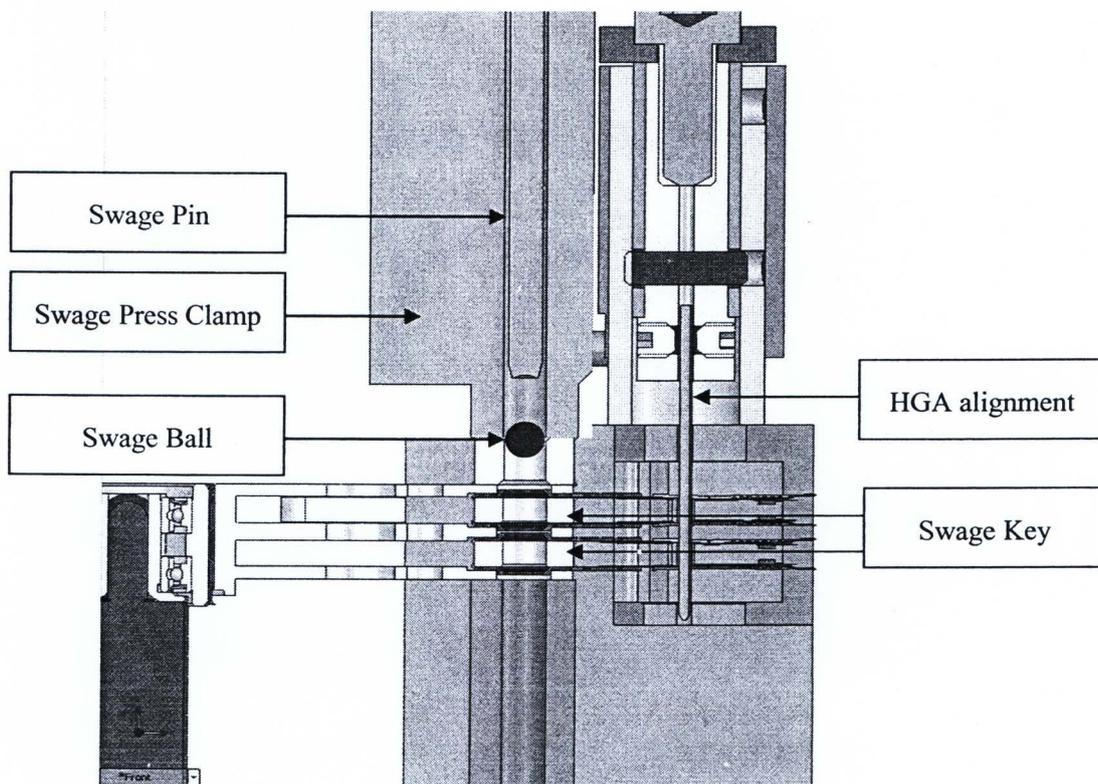
(ข) แขนหัวอ่านเขียน (Actuator Arm)

(ค) กระบวนการสเวจด้วยลูกบอล (Ball Swaging Process) [18]

(ง) ชุดประกอบหัวอ่าน/เขียนสำเร็จ (Head Stack Assembly, HSA) [20]

เครื่องมือที่ใช้ในการประกอบหัวอ่าน/เขียนสำเร็จ (Swaging Machine) ดังภาพที่ 13 ซึ่งมี ส่วนประกอบหลัก ๆ ดังนี้

1. เข็มสเวจ (Swage Pin) ทำหน้าที่ยิงหรือคั่นลูกบอล เพื่อบีบอัดแผ่นฐาน (Base Plate) ให้ติดกับ แขนหัวอ่าน/เขียน (Actuator arm)
2. อุปกรณ์จับกดชิ้นงาน (Swage Press Clamp) ทำหน้าที่ จับยึดชิ้นงาน ให้อยู่นิ่งขณะที่ยิงลูกบอล โดยที่กดด้วยแรง 150 – 250 ปอนด์
3. ชิ้นส่วนรองแขนหัวอ่าน/เขียนในแต่ละหัวอ่าน (Swage Key) ทำหน้าที่เป็นตัวรองหรือกั้นในแต่ละชั้นของหัวอ่าน/เขียน ให้ระยะห่างในแต่ละชั้นคงที่
4. ลูกบอล (Swage Ball) เป็นอุปกรณ์ที่สำคัญและมีผลต่อกระบวนการสเวจ ที่สุด ซึ่งทำมาจาก Stainless Steel มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางระหว่าง 0.078 – 0.0823 นิ้ว ซึ่งการกำหนดขนาดและจำนวนลูกบอลที่ใช้ ขึ้นอยู่กับแต่ผลิตภัณฑ์
5. ชุดจัดแนวหัวอ่าน/เขียน (HGA alignment) ทำหน้าที่เป็นตัวยึดไม่ให้หัวอ่าน/เขียนเคลื่อนตัวและจัดให้หัวอ่าน/เขียน อยู่ในแนวตรงกัน ในขณะที่ทำการสเวจ



ภาพที่ 13 โครงสร้างของเครื่องสเวจ

ขั้นตอนในการทำงานของเครื่องสเวจ (Swaging Machine) มีดังนี้

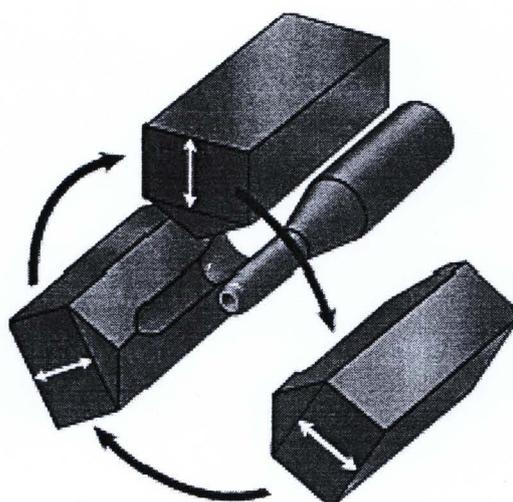
1. นำชุดประกอบหัวอ่าน/เขียนสำเร็จ (HAS) ใส่ในชุดจับยึดชิ้นงาน (Swage Shuttle) โดยจะขึ้นส่วนรองแกนหัวอ่าน/เขียนในแต่ละหัวอ่าน (Swage Key) มาสอดรับในแต่ละชั้นของแกนหัวอ่าน/เขียน แล้วเอาเข้าสู่เครื่องสเวจ

2. อุปกรณ์จับกดชิ้นงาน (Swage Press Clamp) กดด้วยแรง 150 – 250 ปอนด์ เพื่อให้แผ่นฐาน กับ แกนหัวอ่าน/เขียน อยู่ ณ ึ่งขณะที่ยิงลูกบอล

3. เข็มสเวจ (Swage Pin) จะดันลูกบอล ด้วยความเร็ว ประมาณ 5 – 60 เมตรต่อวินาที โดยค่าความเร็วสามารถปรับค่าได้ ซึ่งลูกบอล จะมีขนาดใหญ่กว่ารูของแผ่นฐาน เพื่อที่จะบีบอัดบริเวณรูของแผ่นฐาน (Base Plate Hub) ให้ขยายไปยึดติดบริเวณขอบรูของแกนหัวอ่าน/เขียนข้อมูล (Actuator Coil) เพื่อให้ได้ ชุดประกอบหัวอ่าน/เขียนสำเร็จ (Head Stack Assembly, HSA) ซึ่งวัฏจักรการทำงานหนึ่งครั้งจะใช้เวลาประมาณ 20 – 30 วินาที

### 3.2.2 กระบวนการสเวจ แบบหมุน (Ball Swaging Process)

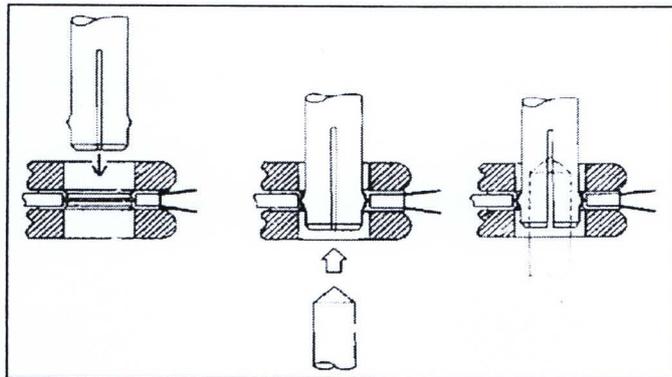
รูปแบบของกระบวนการสเวจ แบบนี้เป็นการลดขนาดของหน้าตัดรูปร่างใดๆ ให้เป็นหน้าตัดรูวงกลม โดยใช้แม่พิมพ์หมุนและบีบอัดหน้าตัดให้ได้ขนาดตามที่ต้องการดังแสดงในภาพที่ 14 ตัวอย่างของอุตสาหกรรมที่นำกระบวนการสเวจ แบบนี้ไปใช้ ได้แก่ การผลิตเพลตส่งกำลัง และ Spline ในรถยนต์ เป็นต้น



ภาพที่ 14 กระบวนการสเวจ แบบหมุน [21]

### 3.2.3 กระบวนการสเวจ แบบใช้การขยายตัวของอุปกรณ์ (Expansion Swaging Process)

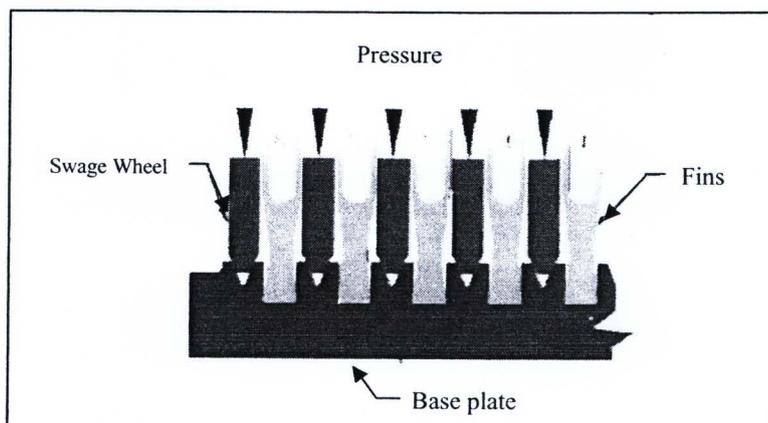
กระบวนการสเวจ แบบใช้การขยายตัวของอุปกรณ์ โดยอุปกรณ์ที่ใช้ในกระบวนการนี้จะเป็นแบบที่สามารถขยายตัวได้ โดยใช้อุปกรณ์อีกชิ้นสอดเข้าไปภายใน ดังแสดงในภาพที่ 15 โดยเมื่อติดตั้งอุปกรณ์ตามตำแหน่งแล้วก็สอดอุปกรณ์ที่ใช้ขยายตัวเข้าไปภายในสาเหตุที่ใช้ปลอกเพื่อป้องกันการเสียดสีระหว่างอุปกรณ์สเวจ กับชิ้นงาน โดยอุตสาหกรรมการประกอบชุดหัวอ่าน/เขียนข้อมูลเข้ากับแขนหัวอ่าน/เขียนข้อมูลของฮาร์ดดิสก์ก็มีการใช้กระบวนการสเวจ แบบนี้



ภาพที่ 15 กระบวนการสเวจ แบบใช้การขยายตัวของอุปกรณ์ [11]

### 3.2.4 กระบวนการสเวจ ในรูปแบบอื่นๆ

นอกจากนี้ยังมีกระบวนการสเวจ ในรูปแบบอื่นอีก คือ ในกระบวนการประกอบครีบริบายความร้อนเข้ากับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ โดยจะใช้ลูกรีด (Swage Wheel) กดแผ่นฐาน ทำให้เนื้อของแผ่นฐาน บีบแน่นติดกับครีบริบายความร้อน ดังแสดงในภาพที่ 16



ภาพที่ 16 กระบวนการประกอบครีบริบายความร้อนเข้ากับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ [22]

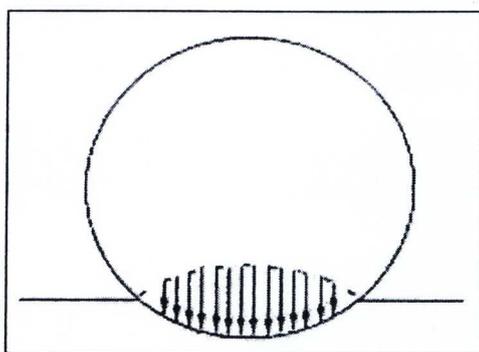
### 3.3 ทฤษฎี

การศึกษาพฤติกรรมต่างๆ เช่น ความดันสัมผัส การเกิดความเค้น การเปลี่ยนรูปของวัสดุที่เกิดขึ้นหลังจากผ่านกระบวนการสเวจ จำเป็นจะต้องศึกษาเพื่อให้เข้าใจทฤษฎีเบื้องต้น เพื่อที่จะสามารถอธิบาย วิเคราะห์ และขยายผลในการปรับปรุงกระบวนการผลิตให้มีคุณภาพดีขึ้น ซึ่งในส่วนของทฤษฎีที่เกี่ยวข้องมีดังต่อไปนี้

#### 3.3.1 กลศาสตร์ของการสัมผัสแบบยืดหยุ่น (Mechanics of Elastic Contacts)

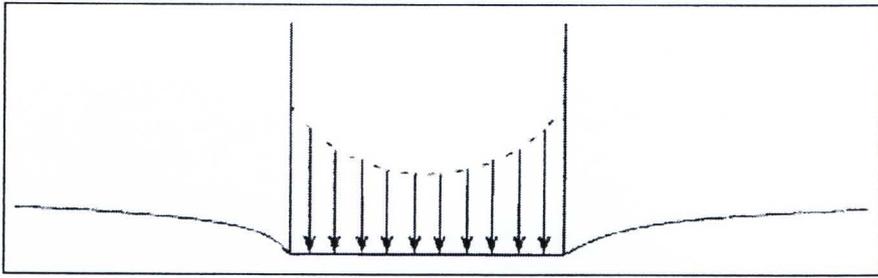
การแบ่งประเภทของการสัมผัสสามารถแบ่งได้หลายแบบ โดยใช้เกณฑ์การแบ่งที่ต่างกันเช่น การแบ่งตามลักษณะของความเค้นที่เกิดขึ้น โดยอาจแบ่งได้ดังนี้

**3.3.1.1 Incomplete Contact** เมื่อมีวัตถุ 2 ชิ้น ถูกกดเข้าด้วยกันการสัมผัสเริ่มแรกจะเป็นแบบจุด แล้วพื้นที่การสัมผัสจะขยายกว้างขึ้นเมื่อเพิ่มแรงกด ลักษณะของความดันสัมผัสระหว่างผิวสัมผัสที่เกิดขึ้นสามารถแสดงได้ดังภาพที่ 17 โดยที่ขนาดของความดันสัมผัสจะลดลงอย่างต่อเนื่องและจะมีค่าเป็นศูนย์ที่ขอบเขตของพื้นที่สัมผัส ตัวอย่างเช่น การสัมผัสกันระหว่างฟันเกียร์ การสัมผัสระหว่างล้อกับรางของรถไฟ เป็นต้น



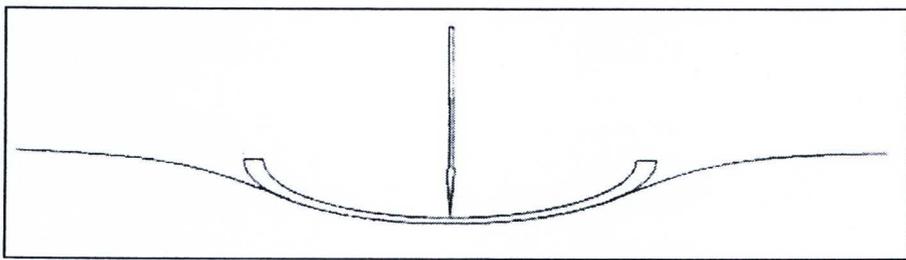
ภาพที่ 17 ลักษณะความดันสัมผัสที่เป็นแบบ Incomplete Contact [23]

**3.3.1.2 Complete Contact** เป็นลักษณะการสัมผัสที่มีพื้นที่ในการสัมผัสที่คงที่ ไม่มีการเปลี่ยนแปลง แม้ว่าแรงที่ใช้ในการกดจะมีขนาดเพิ่มขึ้นก็ตาม ตัวอย่างเช่น การกด Punch บนชิ้นงาน โดยสมมติว่า Punch แข็งกว่าชิ้นงานมากจนอาจกล่าวได้ว่า Punch เป็นวัตถุแข็งเกร็ง ลักษณะของความดันสัมผัสที่เกิดขึ้นสามารถแสดงได้ดังภาพที่ 18 โดยความดันจะมีค่าเพิ่มขึ้นเรื่อยๆอย่างต่อเนื่อง และมีค่าสูงสุดที่ขอบเขตของผิวสัมผัส



ภาพที่ 18 ลักษณะความดันสัมผัสที่เป็นแบบ Complete Contact [23]

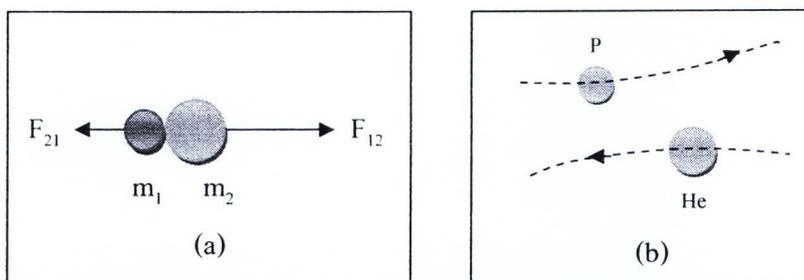
**3.3.1.3 Receding Contact** การสัมผัสแบบนี้ไม่ค่อยพบบ่อยนัก การสัมผัสแบบนี้มีลักษณะที่สำคัญคือ พื้นที่ในการสัมผัส ลดน้อยลงเมื่อแรงกดที่มากระทำเพิ่มมากขึ้น ดังภาพที่ 19 ตัวอย่างการสัมผัสแบบนี้ เช่น การกดแผ่นเสียงลงบนพรหม เป็นต้น



ภาพที่ 19 ลักษณะความดันสัมผัสที่เป็นแบบ Receding Contact [23]

### 3.3.2 การชนกัน (collision)

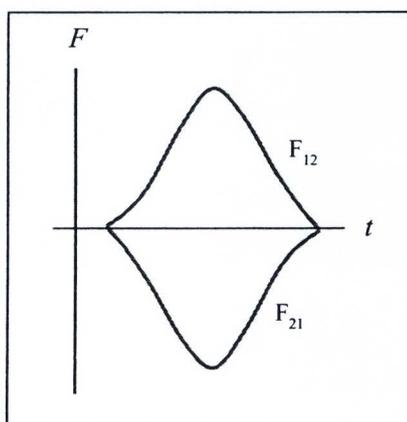
การประยุกต์ใช้กฎการอนุรักษ์โมเมนตัมเชิงเส้น อธิบายว่าเกิดอะไรขึ้นบ้าง ขณะที่อนุภาค 2 อนุภาค ชนกัน เราใช้คำว่า "การชนกัน" (Collision) หมายถึง อนุภาค 2 อนุภาค เข้าชนกันในระยะเวลาอันสั้น ทำให้เกิดแรงคลต่อกัน โดยพิจารณาว่าแรงคลที่เกิดขึ้นมีขนาดมาก ๆ การชนกันระหว่างอนุภาคอาจจะเป็นการชนกันจริง ๆ โดยอนุภาคสัมผัสกันดังแสดงในภาพ 20 (a) ในกรณีการชนกันในระดับอะตอมการชนกันอาจจะไม่มีการสัมผัสกันก็ได้ ดังตัวอย่างในภาพ 20 (b) ซึ่งเป็นการชนกันระหว่างโปรตอนกับอนุภาคแอลฟา (Alpha Particle) ซึ่งเป็นนิวเคลียสของอะตอมฮีเลียม จะพบว่าทั้งโปรตอนและอนุภาคอัลฟาต่างก็มีประจุเป็นบวก อนุภาคจึงไม่มีโอกาสสัมผัสกัน ทั้งนี้เนื่องจาก ต่างก็มีแรงผลักรันตลอดเวลา เมื่ออนุภาคทั้งสองเคลื่อนที่มาใกล้กัน แรงผลักรทางไฟฟ้าสถิตจะมีค่าสูงมาก ถ้าอนุภาคทั้งสองมีมวล  $m_1$  และ  $m_2$  ชนกันแสดงดังภาพ 21 แรงคลจะแปรเปลี่ยนไปกับเวลาในลักษณะที่ซับซ้อนมาก แสดงในดังภาพ 20



ภาพที่ 20 การชนกันของวัตถุ 2 ชิ้น

(a) การชนกันโดยตรง

(b) การชนกันของอนุภาคมีประจุ 2 อนุภาค



ภาพที่ 21 แรงคลซึ่งเป็นฟังก์ชันของเวลาของอนุภาค 2 อนุภาคที่ชนกัน [24]

ถ้าแรง  $F_{12}$  เป็นแรงกระทำต่อมวล  $m_1$  และ  $m_2$  โดยที่เราถือว่าไม่มีแรงภายนอกมากระทำต่อระบบ เราจะได้ว่าการเปลี่ยนแปลงโมเมนตัมของมวล  $m_1$  ดังสมการ (3.1) คือ

$$\Delta p_1 = \int_{t_i}^{t_f} F_{12} dt \quad (3.1)$$

โดยการพิจารณาทำนองเดียวกัน ถ้า  $F_{12}$  คือแรงกระทำต่อมวล  $m_2$  โดย  $m_1$  ฉะนั้นการเปลี่ยนแปลงโมเมนตัมของมวล  $m_2$  ดังสมการ (3.2) คือ

$$\Delta p_2 = \int_{t_i}^{t_f} F_{21} dt \quad (3.2)$$

จากกฎข้อที่ 3 ของนิวตัน กล่าวว่าแรงที่กระทำต่อมวล  $m_1$  และ  $m_2$  มีค่าเท่ากันแต่มีทิศทาง ตรงกันข้าม จึงสรุปได้ดังสมการ (3.3) คือ

$$\Delta p_1 = -\Delta p_2$$

$$\Delta p_1 + \Delta p_2 = 0 \quad (3.3)$$

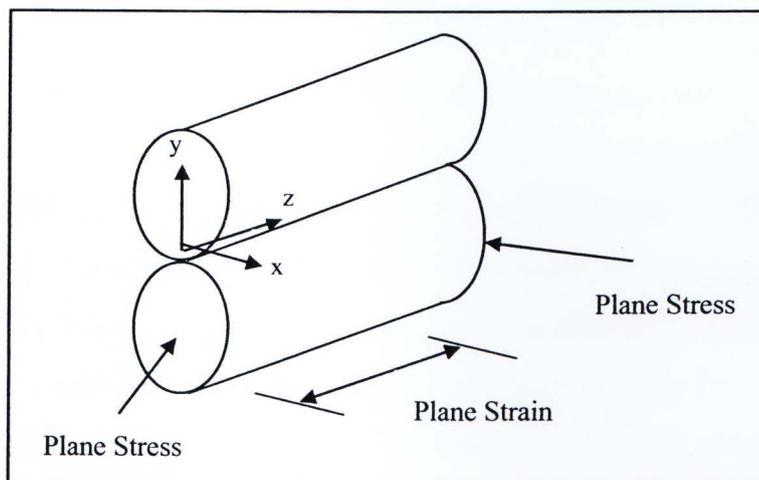
เนื่องจากโมเมนต์รวมทั้งระบบคือ  $p_{sys} = p_1 + p_2$  เราสรุปได้ว่าการเปลี่ยนแปลงโมเมนต์ของระบบเนื่องจากการชนกันจะมีค่าเป็นศูนย์ ดังนั้นจะได้สมการ (3.4)

$$p_{sys} = p_1 + p_2 = \text{constant} \quad (3.4)$$

เนื่องจากไม่มีแรงภายนอกกระทำต่อระบบและแรงคลเป็นแรงภายในระบบ ซึ่งจะไม่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโมเมนต์รวมทั้งระบบ ดังนั้นสรุปได้ว่า "โมเมนต์ทั้งหมดของระบบก่อนการชนกันจะเท่ากับโมเมนต์ทั้งหมดของระบบหลังการชนกัน"

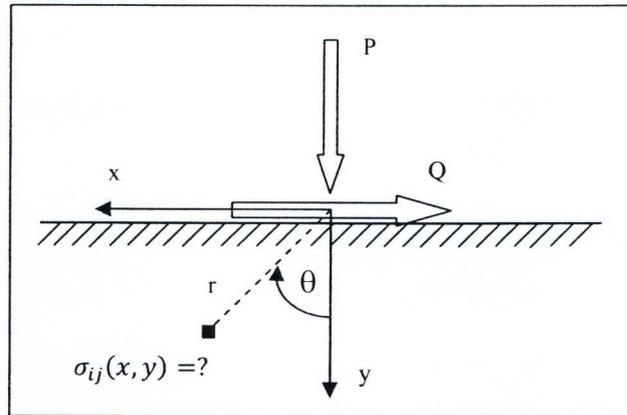
### 3.3.3 การสัมผัสแบบ 2 มิติ (Plane Contacts)

ในสถานะจริงการสัมผัสกันของชิ้นส่วนกลไกจะเป็นการสัมผัสกันแบบ 3 มิติ การวิเคราะห์ผลที่เกิดขึ้นจึงต้องพิจารณาเป็นแบบ 3 มิติด้วย แต่ในบางกรณีก็สามารถลดการพิจารณาให้อยู่ในรูปของปัญหาแบบ 2 มิติได้ เช่น ความเค้นระนาบ (Plane Stress) หรือ ความเครียดระนาบ (Plane Strain) เป็นต้น



ภาพที่ 22 สถานะการเกิดความเค้นเนื่องจากการสัมผัสกันของทรงกระบอกที่มีความยาวเท่ากัน [23]

จากภาพที่ 22 สถานะความเค้นที่เกิดขึ้นจะเปลี่ยนแปลงจากความเค้นระนาบไปเป็นความเครียดระนาบ เมื่อความหนาของทรงกระบอกเพิ่มขึ้น



ภาพที่ 23 ความเค้นในสภาวะความเครียดระนาบเนื่องจาก Line Load [23]

ภาพที่ 23 แสดงความเค้นในสภาวะความเครียดระนาบ เนื่องจากภาระที่ตั้งฉากและภาระที่ขนานกับผิวซึ่งมีขนาด P กับ Q ต่อหนึ่งหน่วยความยาวตามลำดับ การพิจารณาปัญหาที่เกิดจากแรงที่ตั้งฉากกับผิวอย่างเดียวนั้นมีขึ้นครั้งแรกในปี ค.ศ. 1892 โดย Alfred – Aime Flamant [25]

ความเค้นที่เกิดขึ้นเนื่องจากภาระตั้งฉากและขนานกับผิว จะสามารถแสดงได้ดังสมการ (3.5) คือ

$$\sigma_{rr} = \frac{-2}{\pi r} (P \cos \theta - Q \sin \theta) \quad (3.5)$$

$$\sigma_{\theta\theta} = \tau_{r\theta} = 0$$

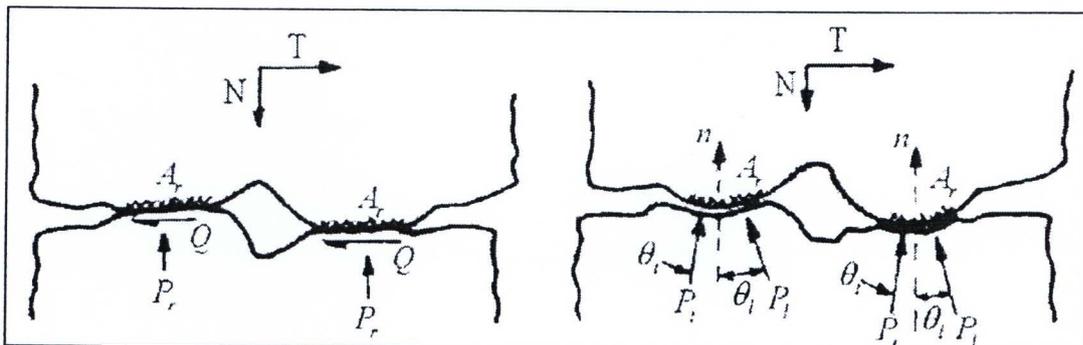
เมื่อ  $r$  และ  $\theta$  เป็นพิกัดในระบบพิกัดเชิงขั้ว (Polar Coordinate)

องค์ประกอบของการสัมผัสในสภาวะจริงจะมีการขรุขระของผิวสัมผัส ซึ่งทำให้เกิดแรงต้านทานที่เรียกว่า “แรงเสียดทาน” ที่เกิดขึ้นในทิศทางที่ขนานกับผิวสัมผัส ลักษณะของความขรุขระนี้จะขึ้นอยู่กับกรรมวิธีการผลิต โดยกรรมวิธีการผลิตแต่ละรูปแบบจะทำให้เกิดความขรุขระที่ต่างกัน เช่น ผิวที่เกิดจากการขัดจะมีความขรุขระน้อยกว่าผิวที่เกิดจากการกลึง เป็นต้น เมื่อพิจารณาแรงเสียดทานที่เกิดขึ้น พบว่าเป็นผลมาจากสาเหตุ 2 ประการด้วยกัน คือ

- การยึดเกาะระหว่างผิววัสดุ ความต้านทานการไถลระหว่างผิวสัมผัสแบบที่เรียกว่า Adhesive Friction เป็นสมบัติเฉพาะของวัสดุ จากภาพที่ 24 (ก) เมื่อค่า  $Q$  คือแรงเฉือนที่เกิดขึ้น และค่า  $P_r$  คือความดันระหว่างผิวสัมผัส จะได้ค่า Adhesive Coefficient of Friction,  $\mu_a$  ดังสมการ (3.6) คือ

$$\mu_a = \frac{Q}{P_a} \quad (3.6)$$

- ความขรุขระของผิวสัมผัส จากภาพที่ 24 (ข) เมื่อลักษณะของผิวสัมผัสไม่ได้ราบเรียบเสมอกัน ความดันที่เกิดขึ้นระหว่างผิวสัมผัสจะทำให้เกิดเป็นแรงของการต้านการไถล



(ก) การยึดเกาะระหว่างผิวสัมผัส

(ข) ความขรุขระของผิวสัมผัส

ภาพที่ 24 องค์ประกอบของแรงเสียดทาน [26]

### 3.3.4 ความต้านโมเมนต์บิด (Tightening Torque)

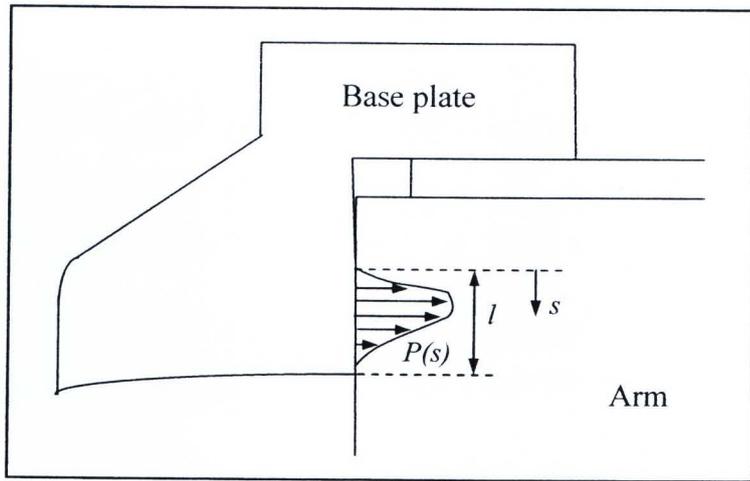
ชุดประกอบหัวอ่าน/เขียนสำเร็จ (Head Stack Assembly, HSA) หลังจากผ่านกระบวนการสเวดด้วยลูกบอล จะเกิดความต้านโมเมนต์บิดระหว่างแผ่นฐาน กับแกนหัวอ่าน/เขียน ซึ่งจะเกิดจากตัวแปรหลัก 2 ตัวแปร คือ

1. ความดันสัมผัส (Contact Pressure,  $P(s)$ ) ที่เกิดขึ้นระหว่างผิวของแผ่นฐาน กับแกนหัวอ่าน/เขียน ซึ่งลักษณะของความดันที่เกิดขึ้นจะเป็นผลมาจากปัจจัยหลายประการ เช่น ขนาดของลูกบอลที่ใช้ในการยิง ความเร็วในการยิง ทิศทางในการยิงบอล และรูปร่างของแผ่นฐาน เป็นต้น ลักษณะของความดันสัมผัสที่เกิดขึ้นจะเปลี่ยนแปลงตามแนวแกนความกว้างของพื้นที่สัมผัส เนื่องจากการสัมผัสที่เกิดขึ้นเป็นการสัมผัสแบบ Incomplete Contact บริเวณขอบเขตของการสัมผัสจะมีค่าความดันเป็นศูนย์ ดังแสดงดังภาพที่ 25

2. ความเสียดทาน (Friction,  $\mu$ ) ระหว่างผิวของแผ่นฐาน กับแกนหัวอ่าน/เขียน ซึ่งในสถานะจริงจะไม่คงที่ตลอดพื้นที่สัมผัส โดยจะขึ้นอยู่กับความเรียบของผิวเป็นสำคัญ โดยที่ความต้านทานโมเมนต์บิด ( $\tau_{\text{Tightening}}$ ) สามารถเขียนให้อยู่ในรูปของสมการได้ดังนี้

$$\tau_{\text{Tightening}} = \mu r^2 \int_0^{2\pi} \int_0^l P(s) ds d\theta \quad (3.7)$$

เมื่อ  $l$  คือความกว้างของพื้นที่สัมผัส และ  $2\pi$  คือมุมที่รองรับการสัมผัสระหว่างผิวของแผ่นฐาน กับแกนหัวอ่าน/เขียน



ภาพที่ 25 ลักษณะการเกิดความดันสัมผัส [19]