

การพัฒนาโปรแกรมสำหรับการปรับสมดุลหน้าแปลนคอมพาเนียน เฟืองดิฟเฟอเรนเชียล

Development of Companion Flange Differential Balancing Program

มนต์ศักดิ์ พิมสาร¹ และ ปิยะ นิลละอ^{2*}

^{1,2} สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง เขตลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร 10520

*ติดต่อ: E-mail: piya.n@hotmail.com, Tel. 086-887-2331

บทคัดย่อ

ชุดเฟืองดิฟเฟอเรนเชียลล้อหน้าของรถกระบะแบบขับเคลื่อนสี่ล้อ ในการเชื่อมต่อเพลากลาง นั้นใช้หน้าแปลนคอมพาเนียนซึ่งมีรูปร่างเป็นแบบทรงกระบอกกลวงแบบลดขนาดผลิตจากเหล็กหล่อเหนียว ซึ่งจะต้องมีการปรับสมดุลของหน้าแปลนเพื่อเป็นการลดความสั่นสะเทือน (vibration) โดยใช้เครื่องปรับสมดุล (balancer machine) ระดับค่าความไม่สมดุล (Unbalance) ที่ยอมรับได้จะต้องเป็นไปตามข้อกำหนดของโรงงานผู้ประกอบรถยนต์ ความไม่สมดุลถูกตั้งสมมุติฐานเป็นแบบระนาบเดียว (Single plane unbalance or Static unbalance) เนื่องจากตัวหน้าแปลนมีเส้นผ่าศูนย์กลางเทียบกับความหนาเมื่ออัตราส่วนเกิน 7:1 การปรับสมดุลใช้วิธีการเจาะเนื้อวัสดุออกรอบๆตัวชิ้นงาน โปรแกรมของเครื่องที่มีอยู่ มีความสามารถในการลด ค่าความไม่สมดุล บนตัวชิ้นงานที่ประมาณไม่เกิน 70 กรัม-เซนติเมตร โดยมีจำนวนรูเจาะสูงสุด 6 รู แต่ปัจจุบันในกระบวนการผลิตพบว่ายังมีชิ้นงานที่ไม่สามารถปรับสมดุลได้ถึง 30% ในบทความนี้จะนำเสนอการพัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่จะเพิ่มความสามารถในการปรับสมดุลของหน้าแปลนคอมพาเนียน ให้มีช่วงของการปรับสมดุล ที่กว้างขึ้นโดยการเพิ่มตำแหน่งรูเจาะสูงสุดให้มากขึ้นเป็น 9 รู ในเบื้องต้นสมการที่ได้จากการวิเคราะห์ได้ถูกนำมาคำนวณหาผลลัพธ์เพื่อทดสอบความถูกต้องโดยเปรียบเทียบกับโปรแกรม เดิมของเครื่อง ที่มีอยู่ พบว่าให้ผลสอดคล้องกัน และความสามารถในการลด ค่าความไม่สมดุลเมื่อเจาะครบทั้งหมด 9 รูทำได้สูงสุดที่ 110 กรัม-เซนติเมตร ซึ่งเพิ่มขึ้นจากเดิมถึง 57 %

คำหลัก: การปรับสมดุลโรเตอร์, เฟืองดิฟเฟอเรนเชียล, หน้าแปลน

Abstract

The front differential unit of the four-wheel drive truck is connected with the drive shaft using a size reducing hollow cylindrical companion flange. The flange is made from ductile cast iron which balancing is needed in order to reduce vibration by using balancer machine. The acceptance unbalance limit is specified by OEM automotive manufacturer. The unbalance of companion flange has been considered to be a single plane unbalance or static unbalance since the ratio of its outside diameter and thickness more than 7:1. Reducing unbalance by drilling unbalance mass around outside diameter of the flange. The program of existing balancer machine has limit capacity of unbalance removal about 70 g-cm.

AMM-2047

maximum. The maximum number of drilling holes used in the process is 6. And it results in high reject rate, up to 30%. Therefore, in this paper, computer program has been developed in order to increase capability of unbalance correction of the companion flange to extend the range of correction by adding more drill holes to be 9 holes. In the beginning, the equation from analytical method is employed to solve the result. Later, it is compared with the existing machine program to check its accuracy. It is found that the results from both calculations are in good agreement. With 9 drilling holes correction, its capacity of unbalance removal is up to 110 g-cm, 57% increasing.

Keywords: Rotor balancing, Differential gear, Companion flange

1. บทนำ

อุตสาหกรรมยานยนต์และชิ้นส่วนยานยนต์ในประเทศไทยจัดเป็นอุตสาหกรรมในระดับต้นที่มีความสำคัญต่อการพัฒนาประเทศ [1]มูลค่าการส่งออกของอุตสาหกรรมยานยนต์โดยรวมเฉลี่ย 8 แสนล้านบาทต่อปี และมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นทุกปี ข้อกำหนดด้านมาตรฐาน เทคนิคและความปลอดภัยในตัวรถยนต์ และชิ้นส่วนที่ใช้ในรถยนต์ที่สูงขึ้น ล้วนส่งผลต่อการพัฒนาเทคโนโลยียานยนต์ ในรถกระบะขนาดหนึ่งตันแบบขับเคลื่อนสี่ล้อใช้หน้าแปลน คอมพานีเยน เป็นตัวเชื่อมต่อระหว่างเพลากลางกับ เฟืองดิฟเฟอเรนเชียล ความไม่สมดุล ซึ่งเป็นหนึ่งในหลาย ๆ ปัจจัยที่ก่อให้เกิดเสียงดัง การสั่นสะเทือนและความรุนแรง หรือที่เรียกกันทั่ว ๆ ว่า NVH (Noise, vibration, and harshness) ซึ่งผู้ผลิตต้องทำการตรวจสอบและแก้ไขชิ้นงานทุกตัวก่อนส่งมอบให้กับโรงงานผู้ประกอบรถยนต์ เครื่องปรับสมดุล จึงถูกนำมาใช้เพื่อลดปัญหาดังกล่าว แต่อย่างไรก็ตามเนื่องจากตัวหน้าแปลนคอมพานีเยนเป็นงานหล่อ บางชิ้นมีค่าความไม่สมดุลสูง เกินขีดจำกัดของเครื่องที่จะสามารถแก้ไขได้ และทิ้งไปเป็นสาเหตุให้เกิดการสูญเสียจำนวนมากรวมถึงการเสียเวลาในกระบวนการผลิต ในบทความนี้ จึงนำเสนอการพัฒนาโปรแกรมสำหรับการปรับสมดุลหน้าแปลนคอมพานีเยนเฟืองดิฟเฟอเรนเชียลของชุดขับเคลื่อนในรถกระบะขนาดหนึ่งตันยี่ห้อหนึ่ง โดยใช้วิธีวิเคราะห์วิธีเชิงวิเคราะห์

ในงานวิจัยที่ผ่านมา นัฐพล และ ปกรณ์ [1] ได้เสนอการปรับสมดุลวัตถุหมุนเกร็งแบบแผ่นดิสก์ทั้ง

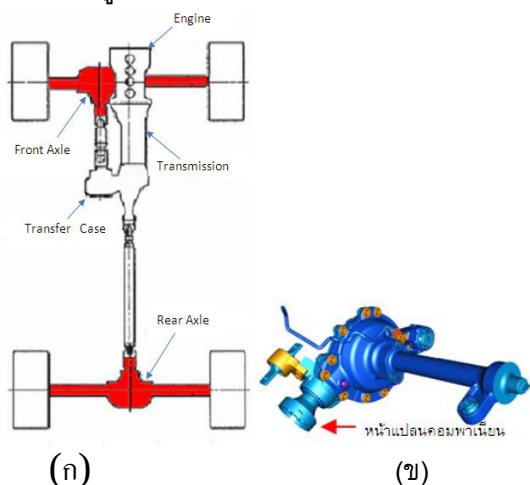
แบบระนาบเดียวและแบบสองระนาบใช้วิธีแบบไล่มวลสู่ศูนย์กลางและคำนวณจากเวกเตอร์ของการสั่นสะเทือน เพื่อหามวลที่ไม่สมดุลโดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ งานวิจัยต่อมาโดย Huang et al.[2] ได้เสนอการปรับสมดุลของเครื่องยนต์แก๊สเทอร์โบไบน์และนิวเคลียร์เทอร์ไบน์ขนาดใหญ่ด้วยวิธี constrained least squares and min-max balancing methods โดยนำ Second Order Cone Programming (SOCP) กับ Maximum correction weight constraint มาใช้ด้วยกันซึ่งให้ การปรับสมดุล ประสิทธิภาพสูง ขึ้น ปัจจุบันวิธีเชิงวิเคราะห์ (analytical methods) [3] โดยไม่ต้องมีมวลสู่ศูนย์กลางได้ถูกนำเสนอในหลายงานวิจัย วิธีนี้มีข้อได้เปรียบที่ไม่ต้องการ trial runs หรือ มีบ้างแต่น้อยครั้ง ในงานวิจัยนี้ได้นำ E-Bias fundamental[4] มาใช้ในการคำนวณหาค่าความไม่สมดุลของตัวชิ้นงานโดยวิธีชดเชยค่าความไม่สมดุลของคัปปลิงและเพลลาของเครื่องปรับสมดุล แต่อย่างไรก็ตาม ต้องมีการสอบเทียบ (calibration) ค่า E-Bias ด้วยชิ้นงานตัวมาตรฐานอยู่อย่างสม่ำเสมอ

2. ลักษณะของหน้าแปลนคอมพานีเยนที่พิจารณา

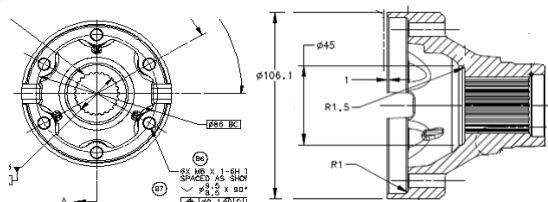
หน้าแปลนคอมพานีเยนมีรูปร่างเป็นทรงกระบอกกลวงแบบลดขนาด ส่วนที่ต้องการปรับสมดุลมีเส้นผ่านศูนย์กลางโตสุดเท่ากับ 106.1 mm. และความหนาเท่ากับ 15.15 mm. ผลิตจากเหล็กหล่อเหนียว และถูกนำมากลึงผิวเป็นบางส่วนนอก เจาะรูเกลียวและทำร่องสไปลน์หลังจากนั้นนำไปประกอบกับชุดดิฟเฟอเรนเชียลโดยสวมกับร่องสไปลน์ของเฟืองเดียว

AMM-2047

หมู (pinion) ผิวของตัวหน้าแปลนคอมพาเนียนบางส่วนซึ่งยังคงเป็นผิวงานหล่อพบว่าไม่รวมศูนย์กับแกนกลางของร่องสไปลันซึ่งเป็นสาเหตุให้เกิดมวลไม่สมดุลบนตัวชิ้นงาน นานเกินกว่าจะทำการปรับสมดุลได้โดยใช้รูปแบบการเจาะมวลดั่งข้างต้นที่กล่าวมา



รูปที่ 1 (ก) แสดงระบบส่งกำลังของ รถกระบะขนาด 1 ตันแบบขับเคลื่อน 4 ล้อ (ข) แสดงรูป 3D CAD โมเดลชุดเฟืองดีฟเฟอเรนเชียลและหน้าแปลนคอมพาเนียน

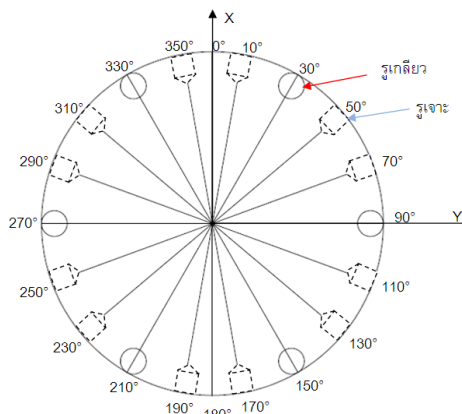


รูปที่ 2 แสดง drawing ของหน้าแปลนคอมพาเนียน

3. การปรับสมดุลของหน้าแปลนคอมพาเนียน แบบปัจจุบันก่อนการปรับปรุง

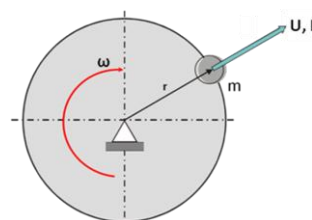
การปรับสมดุลของหน้าแปลนคอมพาเนียนเป็นการปรับสมดุลแบบระนาบเดียว ใช้วิธีการเจาะมวลไม่สมดุลออกบริเวณผิวรอบนอกของชิ้นงานซึ่งอยู่ในระนาบเดียวกัน เนื่องจากชิ้นงานมีรูเกลียว 6 รูอยู่รอบๆ ทุกๆ 60° เพื่อคำนึงถึงความแข็งแรงรูเจาะถูกกำหนดให้มีเส้นผ่าศูนย์กลางขนาด 9.5 mm. ความลึกไม่เกิน 8 mm. จำนวนรูเจาะถูกจำกัดได้สูงสุดไม่เกิน 6 รู ตำแหน่งต้องห่างจากรูเกลียวของชิ้นงาน 20° และระหว่างรูเจาะด้วยกัน 20° จากรูปที่ 3 ตำแหน่งที่เจาะมวลออกได้คือ 10°, 50°, 70°, 110°, 130°, 170°, 190°, 230°, 250°, 290°, 310° และ 350°

ส่วนตำแหน่งรูเกลียวที่ต้องหลบคือ 30°, 90°, 150°, 210°, 270° และ 330° เนื่องด้วยข้อจำกัด (Constraints) เหล่านี้จึงต้องมีโปรแกรมเพื่อคำนวณหาตำแหน่งองศาการเจาะและความลึกของรูเจาะของงานแต่ละชิ้นซึ่งมีค่าความไม่สมดุลเบื้องต้น (Initial unbalance) ที่แตกต่างกัน เครื่องปรับสมดุลที่ใช้อยู่ปัจจุบันทำงานแบบอัตโนมัติด้วยคำสั่งจากโปรแกรมคอมพิวเตอร์ มีการหมุนชิ้นงานเพียงครั้งเดียว (one run method) และทำการเจาะแบบรวดเร็ว หลังจากนั้นจะหมุนชิ้นงานอีกครั้งเพื่อตรวจสอบค่าความไม่สมดุลสุดท้ายที่เหลืออยู่ (Residual unbalance) และระบุตำแหน่งองศาของจุดที่ไม่สมดุล ซึ่งวิธีนี้เหมาะกับระบบการผลิตแบบซ้ำๆ ด้วยยอดผลิตจำนวนมากและตัวชิ้นงานจะต้องมีคุณลักษณะ (specification) ที่ใกล้เคียงกันมาก



รูปที่ 3 แสดงตำแหน่งของรูเจาะแบบสูงสุด 6 รู

4. หลักการปรับสมดุลและสมการที่ใช้ในการคำนวณ



รูปที่ 4 แสดงส่วนประกอบของความไม่สมดุลและแรงเหวี่ยง

$$F = mr\omega^2 \quad (1)$$

$$U = m \times r \quad (2)$$

F = แรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง (centrifugal force)

AMM-2047

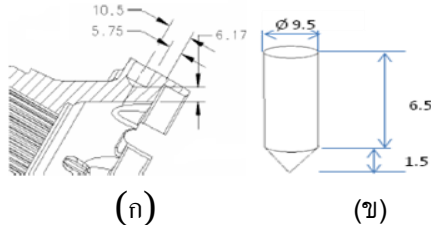
U = ความไม่สมดุล

m = มวลไม่สมดุล

r = รัศมีจากแกนการหมุนถึงจุดศูนย์กลางถ่วงของมวลไม่สมดุล

ω = ความเร็วเชิงมุม

พิจารณาการปรับสมดุลโดยวิธีเจาะมวลไม่สมดุลออก



รูปที่ 5 (ก) แสดงตำแหน่งการเจาะบนความหนาของชิ้นงาน (ข) ลักษณะและขนาดของรูเจาะ

$$U_C = \rho \times V_C \times r_C \quad (3)$$

U_C = ค่าการปรับสมดุล (Correction unbalance)

ρ = ของความหนาแน่นของเหล็กหล่อเหนียว

V_C = ปริมาตรของรูเจาะ

r_C = รัศมีจากแกนการหมุนถึงจุดศูนย์กลางถ่วงของมวลที่เจาะออก

ปริมาตรของรูเจาะหาได้จากสมการต่อไปนี้

$$V_C = V_{Cyl} + V_{Con} \quad (4)$$

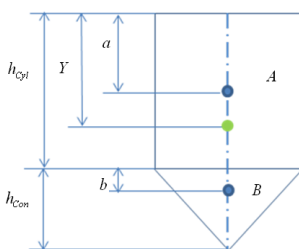
$$V_C = (\pi \times r_{Cyl}^2 \times h_{Cyl}) + \left(\frac{1}{3} \times \pi \times r_{Cyl}^2 \times h_{Con}\right) \quad (5)$$

$$V_C = \pi \times r_{Cyl}^2 \times \left(h_{Cyl} + \frac{1}{3} h_{Con}\right) \quad (6)$$

$$V_C = \pi \times 4.75^2 \times (h_{Cyl} + 0.5) \quad (7)$$

หาดำแหน่งจุดศูนย์กลางถ่วงของรูเจาะ จากสูตร

$$Y = \frac{(A \times a) + (B \times b)}{A + B} \quad (8)$$



รูปที่ 6 แสดงตำแหน่งจุดศูนย์กลางถ่วงของรูเจาะ
พิจารณาที่ทรงกระบอก

$$a = \frac{1}{2} \times h_{Cyl} = 0.5 h_{Cyl} \quad (9)$$

$$A = 9.5 \times h_{Cyl} = 9.5 h_{Cyl} \quad (10)$$

พิจารณาที่ทรงกรวย

$$b = \frac{1}{4} h_{Con} + h_{Cyl} \quad (11)$$

$$b = \frac{1}{4} \times 1.5 + h_{Cyl} = h_{Cyl} + 0.375 \quad (12)$$

$$B = 1.5 \times 4.75 = 7.125 \quad (13)$$

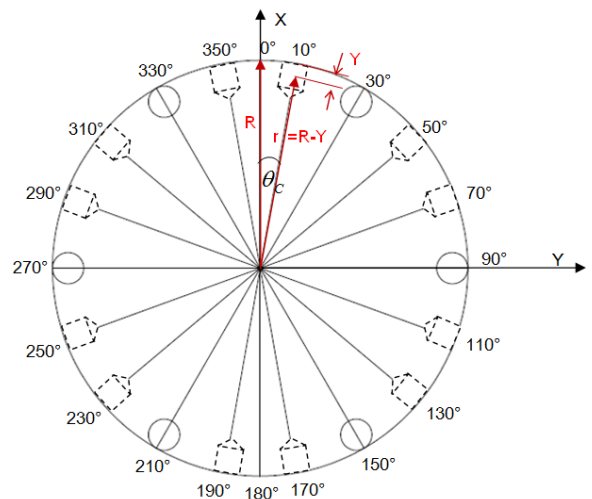
แทนค่า (9), (10), (12) และ (13) ในสมการที่ (8) จะได้

$$Y = \frac{(9.5 h_{Cyl} \times 0.5 h_{Cyl}) + (7.125 \times (h_{Cyl} + 0.375))}{9.5 h_{Cyl} + 7.125} \quad (14)$$

$$Y = \frac{(h_{Cyl} \times 0.5 h_{Cyl}) + (0.75 \times (h_{Cyl} + 0.375))}{h_{Cyl} + 0.75} \quad (15)$$

$$Y = \frac{0.5 h_{Cyl}^2 + 0.75 h_{Cyl} + 0.28125}{h_{Cyl} + 0.75} \quad (16)$$

พิจารณาการหาตำแหน่งรัศมีจากแกนการหมุนถึงจุดศูนย์กลางถ่วงของมวลที่เจาะออก, r_C



รูปที่ 7 แสดงมุมและรัศมีจากแกนการหมุนถึงจุดศูนย์กลางถ่วงของมวลที่เจาะออก

R = ค่ารัศมีโตสุดของหน้าแปลนคอมพานีเยน

θ_C = ขนาดมุมของมวลที่เจาะออก

$$r_C = R - Y = 53.05 - Y \quad (17)$$

แทนค่าสมการ (16) ลงในสมการ (17) จะได้

$$r_C = 53.05 - \frac{0.5 h_{Cyl}^2 + 0.75 h_{Cyl} + 0.28125}{h_{Cyl} + 0.75} \quad (18)$$

$$r_C = \frac{-0.5 h_{Cyl}^2 + 52.3 h_{Cyl} + 39.50625}{h_{Cyl} + 0.75} \quad (19)$$

แทนค่าสมการ (7) และ (19) ลงในสมการ (3) จะได้

$$U_C = \rho \times \pi \times 4.75^2 \times (h_{Cyl} + 0.5) \times \frac{-0.5 h_{Cyl}^2 + 52.3 h_{Cyl} + 39.50625}{h_{Cyl} + 0.75} \quad (20)$$

AMM-2047

$$U_C = \rho \times \pi \times 4.75^2 \times \frac{-0.5h_{Cyl}^3 + 52.05h_{Cyl}^2 + 65.65625h_{Cyl} + 19.753125}{h_{Cyl} + 0.75} \quad (21)$$

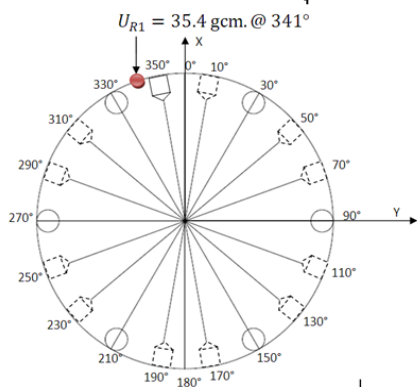
ค่าการปรับสมดุลเขียนในรูปของเวกเตอร์ได้ดังนี้

$$\vec{U}_C = (U_C \cos \theta_C)\vec{i} + (U_C \sin \theta_C)\vec{j} \quad (22)$$

5. การคำนวณค่าการปรับสมดุล

5.1 การปรับสมดุลแบบเจาะมวลออกสูงสุด 6 รู

ตัวอย่าง จากข้อมูลการวัดได้ค่าความไม่สมดุลเบื้องต้นของชิ้นงาน 35.4 g-cm. ที่มุมเฟสที่ 341°

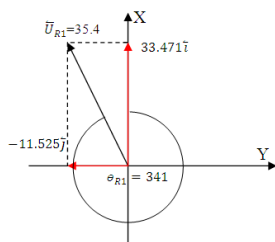


รูปที่ 8 แสดงตำแหน่งที่ต้องการปรับสมดุลเขียนในรูปของเวกเตอร์ได้

$$\vec{U}_{R1} = (U_{R1} \cos \theta_{R1})\vec{i} + (U_{R1} \sin \theta_{R1})\vec{j} \quad (23)$$

$$\vec{U}_{R1} = (35.4 \cos 341^\circ)\vec{i} + (35.4 \sin 341^\circ)\vec{j} \quad (24)$$

$$\vec{U}_{R1} = 33.471\vec{i} - 11.525\vec{j} \quad (25)$$



รูปที่ 9 แสดงพิกัด Cartesian coordinate ของค่าความไม่สมดุลเบื้องต้น $\vec{U}_{R1}$

5.1.1 คำนวณหาองศาของรูเจาะที่ 1

สามารถ หาองศาของรูเจาะ , θ_C ที่ใกล้กับองศาของมวลไม่สมดุล , θ_R มากที่สุด โดยหาค่าสูงสุดของฟังก์ชัน $f(x) = \cos(\theta_R - \theta_C)$ แล้วแทนค่า $\theta_R = 341^\circ$ และ θ_C ตามมุมต่างๆ ได้ผลลัพธ์ตามตารางที่ 1 ดังนั้นจากตารางจะได้ $\theta_{C1} = 350^\circ$

ตารางที่ 1 แสดงค่าของฟังก์ชันที่มุมเจาะต่างๆ

θ_C	$f(x) = \cos(\theta_R - \theta_C)$
10	0.874619707
50	0.35836795
70	0.017452406
110	-0.629320391
130	-0.857167301
170	-0.987688341
190	-0.874619707
230	-0.35836795
250	-0.017452406
290	0.629320391
310	0.857167301
350	0.987688341 (Max.)

5.1.2 คำนวณหาความลึกของรูเจาะที่ 1

เริ่มจากคำนวณหาการปรับสมดุล, $\vec{U}_C$ โดยการแทนค่า $\rho = 0.0081 \text{ g/mm}^3$ และ $h_{Cyl} = 0.1$ ถึง 6.5 ในสมการ (21) และเขียนในรูป เวกเตอร์ตามสมการ (22) โดยแทนค่า $\theta_{C1} = 350^\circ$ จากนั้นนำ $\vec{U}_C$ ไปลบกับค่า $\vec{U}_R$ เพื่อหาค่าความไม่สมดุลที่เหลืออยู่ (Residual unbalance), $\vec{U}_{Rn}, n=1,2,\dots,6$

$$\vec{U}_R - \vec{U}_C = \vec{U}_{Rn+1} \quad (26)$$

คำนวณซ้ำ (Iteration) โดยเพิ่มค่า h_{Cyl} ขึ้นทีละ 0.1 mm. หรือ $\nabla h_{Cyl} = 0.1$ ไปเรื่อยๆจน หยุดการคำนวณเมื่อ $\vec{U}_{Rn+1} \leq 9$ หรือ h_{Cyl} ถึง 6.5 อย่างใดอย่างหนึ่งมาถึงก่อน

ตัวอย่างการคำนวณที่ $h_{Cyl} = 6.5 \text{ mm}$.

$$U_{C1} = 0.0081 \times \pi \times 4.75^2 \times \frac{-0.5(6.5)^3 + 52.05(6.5)^2 + 65.65625(6.5) + 19.753125}{(6.5) + 0.75} \quad (27)$$

$U_{C1} = 198.64 \text{ g-mm}$. หรือ 19.864 g-cm .

เขียนในรูปของเวกเตอร์ตามสมการ (22) ได้

$$\vec{U}_{C1} = (19.864 \cos 350^\circ)\vec{i} + (19.864 \sin 350^\circ)\vec{j} \quad (28)$$

$$\vec{U}_{C1} = 19.562\vec{i} - 3.449\vec{j} \quad (29)$$

จากสมการ (26) ได้ค่าความไม่สมดุลที่เหลืออยู่

$$\vec{U}_{R2} = (33.471\vec{i} - 11.525\vec{j}) - (19.562\vec{i} - 3.449\vec{j}) \quad (30)$$

$$\vec{U}_{R2} = 13.909\vec{i} - 8.076\vec{j} \quad (31)$$

แปลงค่าจากพิกัด Cartesian coordinate เป็น Polar coordinate จะได้

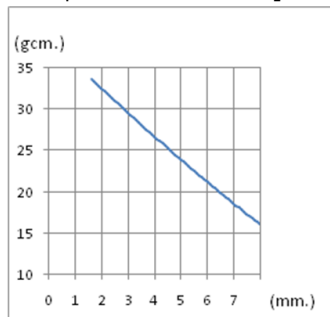
$$|\vec{U}_{R2}| = \sqrt{13.909^2 + (-8.076)^2} = 16.083 \quad (32)$$

AMM-2047

$$\theta_{R2} = \tan^{-1} \frac{-8.076}{13.909} = -30.140 \quad (33)$$

ดังนั้นหลังจากที่เจาะรูที่ 1 ด้วยความลึก 8.0 mm. (รวมส่วนที่เป็นกรวย 1.5 mm. ด้วยแล้ว) ความไม่สมดุลที่เหลืออยู่, $\bar{U}_{R2} = 16.083$ g-cm.

@ -30.140° หรือ 329.860° แล้วนำไปเทียบกับค่าความไม่สมดุลที่ยอมรับได้ซึ่งกำหนดไว้ที่ 9 g-cm. จึงต้องทำการปรับสมดุลเพิ่มโดยการเจาะรูที่สองต่อไป



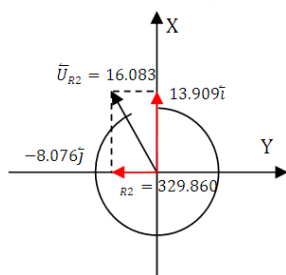
รูปที่ 10 แสดงค่าความไม่สมดุลที่เหลืออยู่, $\bar{U}_{R2}$

เทียบกับแต่ละระดับความลึกของรูเจาะที่ 1

5.1.3 คำนวณหาองศาของรูเจาะที่ 2

หลังจากที่เจาะรูที่ 1 ความไม่สมดุลที่เหลืออยู่ เขียนในรูปของเวกเตอร์ได้

$$\bar{U}_{R2} = 13.909\bar{i} - 8.076\bar{j} \quad (34)$$



รูปที่ 11 แสดงพิกัด Cartesian coordinate ของ

ตารางที่ 2 แสดงค่าของฟังก์ชันที่มีมุมเจาะต่างๆ

θ_C	$f(x) = \cos(\theta_R - \theta_C)$
10	0.76447
50	0.17124
70	-0.17605
110	-0.76761
130	-0.94053
170	-0.93885
190	-0.76447
230	-0.17124
250	0.17605
290	0.76761
310	0.94053 (Max.)
350	0.93885

ใช้วิธีแบบเดิมคำนวณหาค่า θ_{C2} โดยแทน

ค่า $\theta_R = 329.860^\circ$ และ θ_C ตามมุมต่างๆ ได้ผลลัพธ์ตามตารางที่ 2 ดังนั้นจากตารางจะได้ $\theta_{C2} = 310^\circ$

5.1.4 คำนวณหาความลึกของรูเจาะที่ 2

ใช้วิธีแบบเดิมตามหัวข้อที่ 5.1.2 ในคำนวณโดยแทน

ค่า $\theta_{C2} = 310^\circ$ คำนวณซ้ำไปเรื่อยๆ โดยเพิ่มค่า h_{Cyl} ขึ้นทีละ 0.1 mm. และเมื่อ h_{Cyl} มีค่าเท่ากับ 2.2 mm. จะได้

$$\bar{U}_{C2} = 5.139\bar{i} - 6.125\bar{j} \quad (35)$$

$$\bar{U}_{R3} = (13.909\bar{i} - 8.076\bar{j}) - (5.139\bar{i} - 6.125\bar{j}) \quad (36)$$

$$\bar{U}_{R3} = 8.770\bar{i} - 1.951\bar{j} \quad (37)$$

$$|\bar{U}_{R3}| = \sqrt{8.770^2 + (-1.951)^2} = 8.984 \quad (38)$$

$$\theta_{R3} = \tan^{-1} \frac{-1.951}{8.770} = -12.543 \quad (39)$$

ดังนั้นหลังจากที่เจาะรูที่ 2 ด้วยความลึก 3.7 mm.

ความไม่สมดุลที่เหลืออยู่, $\bar{U}_{R3} = 8.984$ g-cm. @

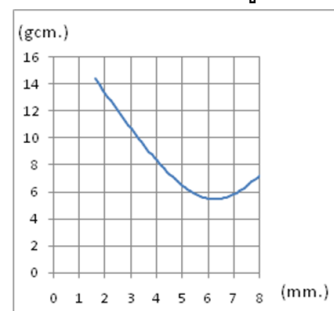
-12.543° หรือ 347.457° เมื่อเปรียบเทียบกับ

ข้อกำหนดได้ว่า $\bar{U}_{R31} < 9$ จึงสามารถหยุดการคำนวณเพียงแค่นี้ได้

จากรูปที่ 14 สังเกตว่าเมื่อเจาะถึงความลึกที่ 6.2 mm.

ค่าของ $\bar{U}_{R3}$ จะมีค่าต่ำสุดและค่อยๆ เพิ่มขึ้นอีกหลังจาก

ที่ความลึกของรูเจาะมากขึ้น นั่นคือที่ 6.2 mm. เป็นค่าที่ดีที่สุด (optimum point) ของรูเจาะที่ 2



รูปที่ 12 แสดงค่าความไม่สมดุลที่เหลืออยู่, $\bar{U}_{R3}$ เทียบ

กับระดับความลึกของรูเจาะที่ 2

5.1.5 การเปรียบเทียบกับโปรแกรมของเครื่องปรับ

สมดุลปัจจุบันเพื่อทดสอบความถูกต้อง

จาก ตารางที่ 3 ได้นำ ผลการคำนวณเทียบกับ

โปรแกรมของเครื่องปรับสมดุลที่ใช้งานอยู่ ซึ่งทั้งสอง

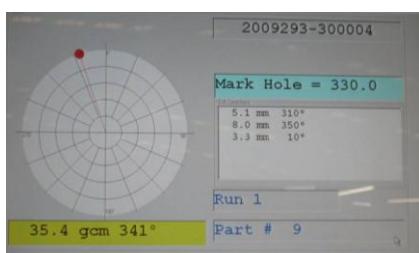
แบบยังเป็นการปรับสมดุลแบบเจาะมวลออกสูงสุด

6 รู จากผลลัพธ์ แสดงให้เห็นว่า ทั้งสองแบบ มีความ

AMM-2047

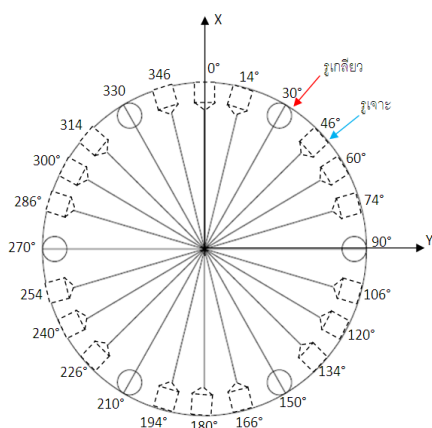
สอดคล้องและใกล้เคียงกันและยิ่งไปกว่านั้น แบบการคำนวณยังมีความถูกต้องแม่นยำมากกว่าด้วย ซึ่งเห็นได้จากจำนวนการเจาะที่น้อยลง จึงสามารถสรุปได้ว่าสมการที่วิเคราะห์มานี้มีความถูกต้องน่าเชื่อถือ ตารางที่ 3 แสดงผลการคำนวณเทียบกับโปรแกรมของเครื่องปรับสมดุลที่ใช้งานอยู่

รูเจาะที่	โปรแกรมปัจจุบัน		การคำนวณ Analytical method	
	ความลึก (mm.)	องศา	ความลึก (mm.)	องศา
1	8.0	350°	8.0	350°
2	5.1	310°	3.7	310°
3	3.3	10°	-	-



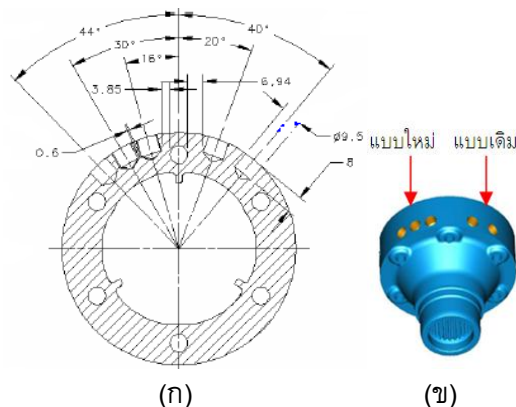
รูปที่ 13 ผลการใช้งานโปรแกรมของเครื่องปรับสมดุลที่ใช้งานอยู่ปัจจุบัน

5.2 การปรับสมดุลแบบเจาะมวออก สูงสุด 9 รู เพื่อเพิ่มขีดความสามารถ ในการปรับสมดุล ให้มีช่วงของการแก้ไขที่กว้างขึ้น จึงพิจารณาด้วยการเพิ่มตำแหน่งองศาการเจาะให้ถี่ขึ้น แต่ยัง อยู่ที่ระนาบเดิม ขนาดรูและความลึกเท่าเดิม เปลี่ยนเฉพาะ ระยะห่างจากรูเกลียวถึงรูเจาะเป็น 16° และระยะห่างจากรูเจาะด้วยกันได้ 14°

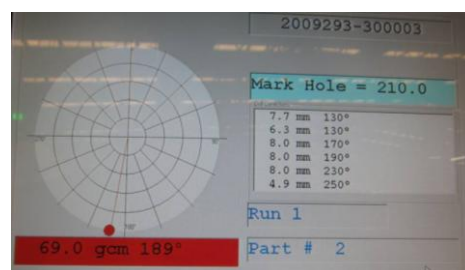


รูปที่ 14 แสดงตำแหน่งของรูเจาะทั้งหมดของการปรับสมดุลแบบเจาะมวออกสูงสุด 9 รู

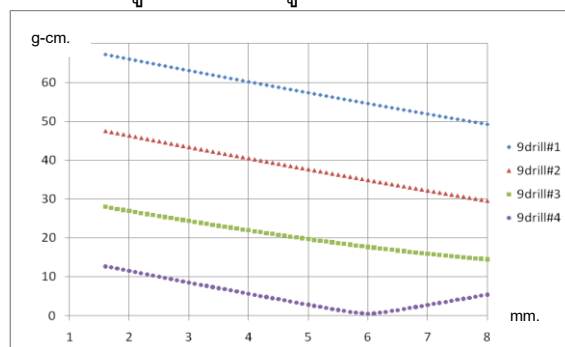
จากรูปตำแหน่งที่เจาะมวออกได้คือ 0°, 14°, 46°, 60°, 74°, 106°, 120°, 134°, 166°, 180°, 194°, 226°, 240°, 254°, 286°, 300°, 314° และ 346°



รูปที่ 15 เปรียบเทียบรูปแบบการเจาะระหว่างแบบเดิม และแบบใหม่ที่น่าเสนอ (ก) ภาพหน้าตัด (ข) ภาพ 3D ตัวอย่าง กรณีศึกษาโดยนำชิ้นงานที่เครื่องปรับสมดุล ซึ่งใช้โปรแกรมแบบเดิมไม่สามารถทำการปรับสมดุล ได้มาพิจารณา



รูปที่ 16 แสดงหน้าจอของเครื่องปรับสมดุลแบบเจาะมวออกสูงสุด 6 รู ซึ่งไม่สามารถปรับสมดุลได้ จากรูปที่ 16 เครื่องปรับสมดุลวัดได้ค่าความไม่สมดุลเบื้องต้นของชิ้นงาน 69 g-cm. ที่มุมเฟส 189° ต่อมาได้ใช้วิธีการคำนวณแบบเดียวกันกับการปรับสมดุลแบบ 6 รูดังที่กล่าวมาแล้วข้างต้น แต่เปลี่ยนเป็นรูปแบบการเจาะแบบ 9 รูได้ผลลัพธ์ดังรูปที่ 17 และตารางที่ 3



รูปที่ 17 กราฟแสดงค่าความไม่สมดุลเทียบกับความลึกของรูเจาะในการปรับสมดุลแบบเจาะสูงสุด 9 รู

AMM-2047

ตารางที่ 3 แสดงผลการคำนวณเทียบกับโปรแกรมของเครื่องปรับสมดุลที่ใช้งานอยู่

รูเจาะที่	โปรแกรมเครื่องปัจจุบัน		การคำนวณแบบเจาะสูงสุด 9 รู	
	ความลึก (mm.)	องศา	ความลึก (mm.)	องศา
1	8.0	190°	8.0	194°
2	8.0	170°	8.0	180°
3	8.0	230°	8.0	166°
4	6.3	130 °	2.9	226°
5	4.9	250°	-	-
6	7.7	130°	-	-
7	-	-	-	-
8	-	-	-	-
9	-	-	-	-
$\bar{U}_R$	Error (shown red)		8.84g-cm @229 °	

จากตารางที่ 3 ในกรณีที่ค่าความไม่สมดุลเริ่มต้นของชิ้นงาน มีค่าสูงโปรแกรมการเจาะแบบ 6 รูไม่สามารถทำการปรับสมดุลได้ เนื่องจาก การจำกัดของตำแหน่งการเจาะ สังเกตว่าโปรแกรมจะคำนวณให้เจาะซ้ำที่ตำแหน่ง 130° สองครั้งเพื่อเอามวลที่ไม่สมดุลออก ซึ่งไม่สามารถทำได้ และเมื่อใช้วิธีการคำนวณแบบเจาะ 9 รู สามารถทำการปรับสมดุลได้ เนื่องจากวิธีแบบวิเคราะห์มีความถูกต้องแม่นยำกว่าวิธีการที่โปรแกรมของเครื่องใช้อยู่ และที่การเจาะแบบ 9 รูจะมีประสิทธิภาพ สูงสุดสังเกตจากความชันของเส้นกราฟระหว่าง ความไม่สมดุลเทียบกับ ระดับ ความลึก ของรูเจาะในรูปที่ 17 การลดลงของความไม่สมดุลของแบบ 9 รูลดลงอย่างต่อเนื่องจนถึงจุดต่ำสุด

6. สรุปผล

จากผลการคำนวณและเปรียบเทียบผลแสดงให้เห็นว่าการเจาะแบบ สูงสุด 9 รูสามารถเพิ่มขีดความสามารถในการปรับสมดุลของหน้าแปลนคอมพานีเยน ได้และยังมีประสิทธิภาพ เพิ่มขึ้นอีกด้วยเนื่องจาก การมีองศาในการเจาะที่ถี่ ขึ้นทำให้ตำแหน่งการเจาะมีความใกล้เคียงกับตำแหน่งที่มีมวลไม่สมดุลอยู่มากขึ้น และในขณะเดียวกันยังทำให้จำนวนรูเจาะน้อยลงด้วย ซึ่งถือว่าเป็นการปรับปรุงทั้งด้านประสิทธิภาพและ เวลาในการปรับสมดุล ตัวชิ้นงาน ซึ่งส่งผลดีอย่างมากกับ

กระบวนการผลิต ปัจจุบัน และในอนาคตสามารถพัฒนาสมการคำนวณในรูปแบบการหาค่าที่ดีที่สุด

(Optimization) ร่วมกับการวิเคราะห์ความแข็งแรงโดยใช้วิธีทางไฟไนท์อีลิเมนต์ เพื่อนำไปประยุกต์ใช้กับชิ้นงานคอมพานีเยนรุ่นอื่นๆเพื่อให้สามารถหาขนาดและตำแหน่งของรูเจาะที่เหมาะสมที่สุดในงานวิจัยนี้ เนื่องจากตัวชิ้นงาน เครื่องมือและเครื่องปรับสมดุลมีการออกแบบและใช้งานอยู่แล้ว การเลือกใช้ขนาดรูและตำแหน่งการเจาะ จึงต้องสอดคล้องและเข้ากับ สิ่งที่มีอยู่ซึ่งป็นข้อจำกัดในการ หาค่าที่ดีที่สุด อย่างไรก็ตามในท้ายสุดชิ้นงานตัวอย่างที่ใช้วิธีการเจาะแบบ 9 รูได้ถูกนำไปทดสอบความแข็งแรงก่อนการนำมาใช้งานจริง ซึ่งได้ผลการทดสอบ ผ่านตามข้อกำหนดของบริษัทผู้ผลิตรถยนต์

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] นัฐพล ทรงพัฒน์โยธิน และ ปกรณ์ พรเดิม (2545). การปรับสมดุลวัตถุหมุนเกร็ง, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
- [2] Bin Huang, Daiki Fujimura, Paul Allaire, Zongli Lina and Guoxin Lic, Constrained balancing of two industrial rotor systems: Least squares and min-max approaches, *Shock and Vibration* 16 (2009) 1–12 DOI 10.3233/SAV-2009-0451 IOS Press
- [3] A. El-Shafei, A.S. El-Kabbany and A.A. Younan, Rotor Balancing without Trial Weights, *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power* 126(3) (2004), 604–609.
- [4] Shenck Trebel Corporation, Fundamentals Of Balancing, 52944 Axle Balancer presentation, Dana Spicer Rayong Thailand
- [5] สถาบันยานยนต์ กระทรวงอุตสาหกรรม , แผนแม่บทอุตสาหกรรมยานยนต์ปี พ.ศ. 2555 – 2559, URL:http://www.thaiauto.or.th/2012/th/about-us/download/Master_Plan_Final_2555-2559.pdf