

การเปรียบเทียบการลดการสั่นสะเทือนในเครื่องยนต์สูบเดียว Comparing the Vibration Suppression of a Single Cylinder Engine

Suwin Slesongsom^{1*}

¹ Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Chiangrai College,
Chiangrai 57000, Thailand, Tel: 0-5371-0081 Fax: 0-5371-0081 *E-mail: suwins2000@yahoo.com

บทคัดย่อ

วัตถุประสงค์ของการวิจัยนี้ คือ ต้องการเปรียบเทียบการลดการสั่นสะเทือนในเครื่องยนต์สูบเดียว ด้วยวิธีการถ่วงสมดุลแบบพาสซีฟ (Passive Balancing) และวิธีการถ่วงสมดุลแบบแอคทีฟ (Active Balancing) โดยทำการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเครื่องยนต์สูบเดียวที่มีการถ่วงสมดุลในทิศทางตรงกันข้ามกับแกนข้อเหวี่ยง ซึ่งจัดเป็นการถ่วงสมดุลแบบพาสซีฟ และสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเครื่องยนต์สูบเดียวที่มีการถ่วงสมดุลโดยใช้คู่มวลหมุนสวนทางกัน ซึ่งจัดเป็นการถ่วงสมดุลแบบแอคทีฟ ประยุกต์ใช้วิธีการหาค่าเหมาะสมที่สุดเพื่อทำให้การสั่นสะเทือนมีค่าต่ำสุด ปัญหาการหาค่าเหมาะสมที่สุดจะเป็นปัญหาการหาค่าต่ำสุดการสั่นสะเทือนของเครื่องยนต์สูบเดียวในทิศทาง y และ θ_z ที่รอบการทำงานของเครื่องยนต์ต่างๆ กัน นั่นคือ 1000 1500 2000 3000 และ 4000 รอบต่อนาที ตัวแปรออกแบบในการหาค่าเหมาะสมที่สุดประกอบด้วยตำแหน่งและขนาดของมวลถ่วงสมดุล มุมระหว่างมวลหมุนสวนทางกัน (เฉพาะการถ่วงสมดุลแบบแอคทีฟ) มวลสลักแกนข้อเหวี่ยง มวลลูกสูบ รวมทั้งมวลสลักลูกสูบ และรูปร่างของก้านสูบ เนื่องจากเป็นปัญหาการหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบหลายฟังก์ชันเป้าหมาย จึงหาเซตของผลเฉลยที่เหมาะสมที่สุดของพาราโตโดยใช้วิธีการข้อบังคับดัดแปลง (The modified Normalized Normal Constraint) จากผลการศึกษาพบว่าวิธีการถ่วงสมดุลแบบพาสซีฟจะให้ผลในการลดการสั่นสะเทือนในทิศทาง y เป็น 67 - 97 % และ θ_z เป็น 26 - 86 % เมื่อเทียบกับการออกแบบที่คำนึงถึงความแข็งแรงแต่เพียงอย่างเดียว ขณะที่การถ่วงสมดุลแบบแอคทีฟจะให้ผลในการลดการสั่นสะเทือนในทิศทาง y เป็น 73 - 97 % และ θ_z เป็น 32 - 88 % เมื่อเทียบกับการออกแบบที่คำนึงถึงความแข็งแรงแต่เพียงอย่างเดียว ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าวิธีการถ่วงสมดุลแบบแอคทีฟจะให้ผลในการลดการสั่นสะเทือนได้ดีกว่าวิธีการถ่วงสมดุลแบบพาสซีฟ

Abstract

The purpose of this research is to compare the method used to vibration suppression of single cylinder engine. The methods are passive balancing and active balancing. After construct the mathematical model of the single cylinder engine which is

balancing by using added masses opposite of the cylinder crank. This method is passive balancing. Construct the mathematical model of the single cylinder engine which balancing by using pair contra rotating balancing masses. The method is active balancing. Then the optimization method has been applied to minimize vibrations. The optimization problem is to minimize vibrations of the single cylinder engine at various engine speeds, i.e., 1000, 1500, 2000, 3000, and 4000 rpm. Design parameters include position and magnitude of balancing mass, phase shift of contra balancing masses (only active balancing), mass of crank pins, mass of piston and piston pin, and connecting rod shape. As the problem being multi-objective optimization, the Pareto optimal set is determined by using the Modified Normalized Normal Constraint. From the results obtained, it is shown that the passive balancing can be used to give range of vibration reduction in various directions as $y = 67 - 97 \%$ and $\theta_z = 26 - 86 \%$ as compared to the design with only strength criterion and the active balancing can be used to give range of vibration reduction in various directions as $y = 73 - 97 \%$ and $\theta_z = 32 - 88 \%$ as compared to the design with only strength criterion. Such that, the active balancing method is better than passive balancing method.

1. บทนำ

เครื่องยนต์สูบเดียวเป็นเครื่องยนต์ที่ได้รับความนิยมอย่างแพร่หลายในวงการเกษตร การสั่นสะเทือนเป็นปัญหาหลักของเครื่องยนต์สูบเดียว มีสาเหตุมาจากแรงเฉื่อยเนื่องจากชิ้นส่วนที่มีการเคลื่อนที่ของชุดกลไกเครื่องยนต์สูบเดียว การลดการสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 วิธี คือ การถ่วงสมดุล (Balancing) และการกั้นการสั่นสะเทือนออก (Vibration Isolation) โดยที่การถ่วงสมดุลสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 วิธี คือ การถ่วงสมดุลแบบแอคทีฟ (active balancing) และการถ่วงสมดุลแบบพาสซีฟ (passive balancing)

การถ่วงสมดุลแบบแอคทีฟ คือ วิธีการที่ใช้ในการลดแรงเฉื่อยและโมเมนต์เฉื่อยเพียงบางส่วนหรือทั้งหมด โดยการเพิ่มหรือลดมวลและมี

การเพิ่มกลไกเข้าไปในระบบ เช่น การเพิ่มลูกสูบสมดุล และวิธีการเพิ่มมวลเข้าไปในรูปแบบของการจัดกระบวนเฟือง เป็นต้น

การถ่วงสมดุลแบบแพสซิฟ คือ วิธีการที่ใช้ในการลดแรงเฉย และโมเมนต์เฉยเพียงบางส่วนหรือทั้งหมด โดยการเพิ่มหรือลดมวลของก้านต่อที่มีการเคลื่อนที่และไม่มีการเพิ่มกลไกใดๆ

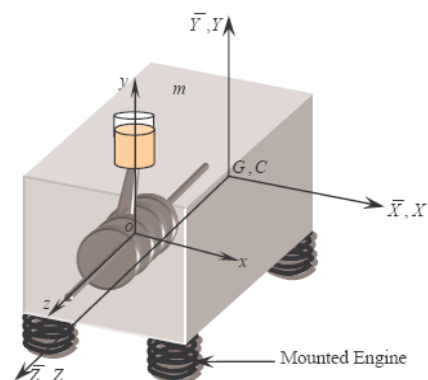
มีนักวิจัยหลายท่านได้ทำการศึกษาวิธีการลดการสั่นสะเทือนในกลไกต่างๆ อันมีสาเหตุมาจากแรงเฉยเนื่องจากชิ้นส่วนที่มีการเคลื่อนที่ โดยวิธีการถ่วงสมดุล ดังจะเห็นได้จากงานวิจัยของ Lowen และคณะ [1] Zhang และ Chen [2] Snyman และคณะ [3] Chiou และคณะ [4] ต่อมาในปี ค.ศ. 2004 สุวิน และคณะ [5] ได้ทำการศึกษาการหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบหลายฟังก์ชันเป้าหมาย ในการลดการสั่นสะเทือนของเครื่องยนต์สูบเดียว โดยทำการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเครื่องยนต์สูบเดียว ต่อจากนั้นประยุกต์ใช้วิธีการหาค่าเหมาะสมที่สุดเพื่อทำให้การสั่นสะเทือนมีค่าต่ำสุด ปัญหาการหาค่าเหมาะสมที่สุดจะเป็นปัญหาการหาค่าต่ำสุดการสั่นสะเทือนของเครื่องยนต์สูบเดียวในทิศทาง y และ θ_z ที่รอบการทำงานของเครื่องยนต์ต่างๆ กัน ตัวแปรออกแบบในการหาค่าเหมาะสมที่สุดประกอบด้วย มวลสลักแขนข้อเหวี่ยง มวลลูกสูบรวมกับมวลสลักลูกสูบ ตำแหน่งจุดศูนย์ถ่วงมวล และรูปร่างของก้านสูบ เนื่องจากเป็นปัญหาการหาค่าเหมาะสมที่สุด แบบหลายฟังก์ชันเป้าหมาย จึงหาเซตของผลเฉลยที่เหมาะสมที่สุดของพาเรโตโดยใช้วิธีการข้อบังคับตั้งฉากไร้มิติได้ดัดแปลง จากผลการศึกษาพบว่าวิธีการหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบหลายฟังก์ชันเป้าหมายเป็นเครื่องมือที่มีประโยชน์เป็นอย่างยิ่งในการลดการสั่นสะเทือนในเครื่องยนต์สูบเดียว โดยในงานวิจัยดังกล่าวนี้การถ่วงสมดุลจะเป็นการถ่วงสมดุลแบบแพสซิฟ ต่อมาในปี ค.ศ. 2006 สุวิน [6] ได้ทำการศึกษาขนาดทางกายภาพของเครื่องยนต์สูบเดียวที่มีการถ่วงสมดุลแบบแอ็คทีฟโดยการติดมวลหมุนสวนทางกัน ที่มีตำแหน่งติดตั้งของกลไกเครื่องยนต์สูบเดียวเยื้องจากตำแหน่ง จุดศูนย์ถ่วงมวลของเครื่องยนต์ ที่รอบการทำงานของเครื่องยนต์ต่างๆ กันที่ทำให้การสั่นสะเทือนในทิศทางตั้งฉากกับฐานและการสั่นสะเทือนในทิศทางรอบแกนขนาน แกนเพลลาข้อเหวี่ยงมีค่าต่ำสุด โดยใช้วิธีการหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบหลายฟังก์ชันเป้าหมาย ปัญหาการหาค่าเหมาะสมที่สุดจะเป็นปัญหาการหาค่าต่ำสุดการสั่นสะเทือนของเครื่องยนต์สูบเดียวในทิศทาง y และ θ_z ที่รอบการทำงานของเครื่องยนต์ต่างๆ กัน ตัวแปรออกแบบในการหาค่าเหมาะสมที่สุดประกอบด้วย ตำแหน่งและขนาดของมวลถ่วงสมดุล มุมระหว่าง มวลหมุนสวนทางกัน มวลสลักแขนข้อเหวี่ยง มวลลูกสูบ รวมกับมวลสลักลูกสูบ และรูปร่างของก้านสูบ เนื่องจากเป็นปัญหาการหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบหลายฟังก์ชันเป้าหมาย จึงหาเซตของผลเฉลยที่เหมาะสมที่สุดของพาเรโต โดยใช้วิธีการข้อบังคับตั้งฉากไร้มิติได้ดัดแปลง จากผลการศึกษาพบว่าวิธีการหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบหลายฟังก์ชันเป้าหมายเป็นเครื่องมือที่มีประโยชน์เป็นอย่างยิ่งในการลดการสั่นสะเทือนในเครื่องยนต์สูบเดียว โดยในงานวิจัยดังกล่าวนี้การถ่วงสมดุลจะเป็นการถ่วงสมดุลแบบแอ็คทีฟ

จากสรุปงานวิจัยที่ผ่านมาจะเห็นว่าวิธีการแก้ปัญหาการสั่นสะเทือนในเครื่องยนต์สูบเดียวทั้งการถ่วงสมดุลแบบแอ็คทีฟ และแบบแพสซิฟแต่ยังไม่มียานวิจัยชิ้นใดที่ทำการเปรียบเทียบการลดการ

สั่นสะเทือนด้วยวิธีการทั้งสอง ดังนั้นวัตถุประสงค์ของการวิจัยนี้ คือ ต้องการเปรียบเทียบการลดการสั่นสะเทือนในเครื่องยนต์สูบเดียว ด้วยวิธีการถ่วงสมดุลแบบแพสซิฟ และวิธีการถ่วงสมดุลแบบแอ็คทีฟ โดยทำการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเครื่องยนต์สูบเดียว ที่มีการถ่วงสมดุลในทิศทางตรงกันข้ามกับแขนข้อเหวี่ยง ซึ่งจัดเป็นการถ่วงสมดุลแบบแพสซิฟ และสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเครื่องยนต์สูบเดียวที่มีการถ่วงสมดุลโดยใช้คู่มวลหมุนสวนทางกัน ซึ่งจัดเป็นการถ่วงสมดุลแบบแอ็คทีฟ ประยุกต์ใช้วิธีการหาค่าเหมาะสมที่สุดเพื่อทำให้การสั่นสะเทือนมีค่าต่ำสุด ปัญหาการหาค่าเหมาะสมที่สุดจะเป็นปัญหาการหาค่าต่ำสุดการสั่นสะเทือนของเครื่องยนต์สูบเดียวที่รอบการทำงานของเครื่องยนต์ ต่างๆ กัน นั่นคือ 1000 1500 2000 3000 และ 4000 รอบต่อนาที

2. แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเครื่องยนต์สูบเดียว

ในการสร้างสมการการเคลื่อนที่ของเครื่องยนต์สูบเดียววางตั้งและ ยางรองแท่นเครื่องที่ตำแหน่งติดตั้งของชุดกลไกเครื่องยนต์สูบเดียวเยื้องจากตำแหน่งจุดศูนย์ถ่วงมวลของเครื่องยนต์ที่สภาวะเดินเบา แบบจำลองของเครื่องยนต์สูบเดียวที่มีการถ่วงสมดุลแบบแพสซิฟและแบบแอ็คทีฟจะมีแบบจำลองที่แตกต่างกันเฉพาะมวลถ่วงสมดุลแบบจำลองของเครื่องยนต์สูบเดียวสามารถพิจารณาได้ดังนี้ พิจารณาให้ส่วนของเสื้อสูบ ฝาสูบ และส่วนต่างๆ ที่ยึดติดอยู่กับเสื้อสูบเป็นวัตถุเกร็งมีมวล m เครื่องยนต์ถูกรองรับด้วยยางรองแท่นเครื่องที่พิจารณาเป็นสปริงแบบสามมิติ ที่มีค่าความแข็งและความหน่วง ในแต่ละทิศทางคงที่ และเป็นอิสระซึ่งกันและกัน จากรูปที่ 1 พิจารณา ให้แรงและโมเมนต์เนื่องจากการเคลื่อนที่ของกลไกเครื่องยนต์สูบเดียว กระทำที่จุด O ซึ่งเป็นจุดกำเนิดของระบบแกนเป็น xyz จุด G, C เป็นจุดกำเนิดของระบบแกนรวมหรือแกนเฉยอ้างอิง $\bar{X}\bar{Y}\bar{Z}$ จุด C คือ ตำแหน่งจุดศูนย์ถ่วงมวลของเครื่องยนต์ และเป็นจุดกำเนิดของระบบแกนวัตถุ XYZ ที่สภาวะสมดุลสถิต หรือ สภาวะที่เครื่องยนต์ยังไม่ทำงาน จุด G จะทับอยู่กับจุดศูนย์ถ่วงมวล C ขณะที่สภาวะเดินเบาดำเนินการจุดศูนย์ถ่วงมวล C ของระบบจะเกิด การกระจัดไปเล็กน้อยเป็นระยะ $x_c, y_c, z_c, \theta_x, \theta_y, \theta_z$



รูปที่ 1 แสดงแบบจำลองของเครื่องยนต์สูบเดียว

เป็นผลให้สามารถจัดรูปแบบระบบสมการการเคลื่อนที่ของเครื่องยนต์และฐานได้ดังนี้

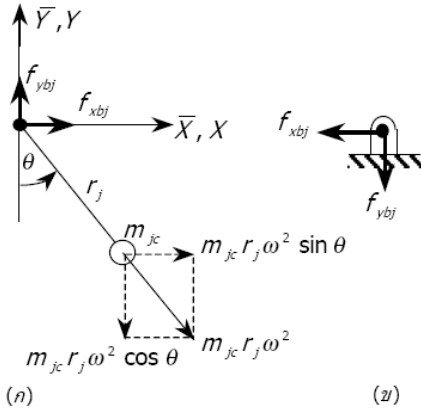
$$[M]\{\ddot{X}\} + [C]\{\dot{X}\} + [K]\{X\} = \{F\} \quad (1)$$

โดยที่ $[M]$ คือ เมทริกซ์ ของมวล, $[C]$ คือ เมทริกซ์ของ ความหน่วง, $[K]$ คือ เมทริกซ์ค่าความแข็งของสปริง, $\{\ddot{X}\}$ คือ เวกเตอร์ความเร่ง, $\{\dot{X}\}$ คือ เวกเตอร์ความเร็ว, $\{X\}$ คือ เวกเตอร์ การกระจัด และ $\{F\}$ คือ เวกเตอร์ของแรง

สมการการเคลื่อนที่ของเครื่องยนต์และฐานของการถ่วงสมดุลแบบ แพสซีฟ และแบบแอ็คทีฟ จะแตกต่างกันเฉพาะแรงและโมเมนต์ เนื่องจากการเคลื่อนที่ของมวลถ่วงสมดุลซึ่งสามารถแยกพิจารณาได้ ดังนี้

(1) แบบจำลองของการถ่วงสมดุลแบบแพสซีฟ

แบบจำลองของการถ่วงสมดุลแบบแพสซีฟจะแสดงดังในรูปที่ 2



รูปที่ 2 (ก) แสดงผังวัตถุอิสระของชุดมวลถ่วงสมดุลที่ระนาบ j

(ข) แสดงแรงปฏิกิริยาที่เกิดจากมวลถ่วงสมดุลกระทำกับ โครงเครื่องยนต์

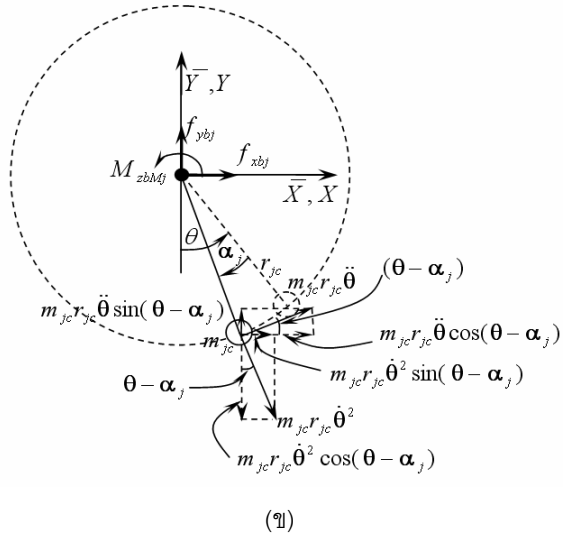
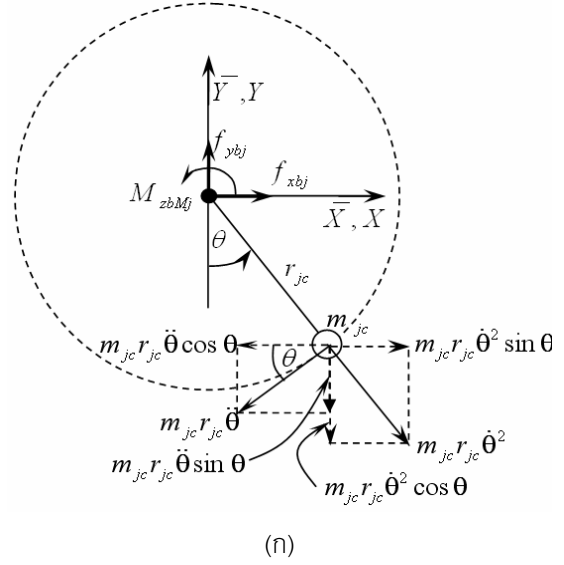
ซึ่งจะเป็นผลให้แรงรวมและโมเมนต์รวมที่เกิดจากมวลถ่วงสมดุล กระทำกับโครงกรอบเครื่องยนต์จะมีค่าเป็นดังนี้

$$\begin{aligned} f_{xb} &= \sum_{j=1}^2 f_{xbj} = \sum_{j=1}^2 m_{jc} r_j \omega^2 \sin \theta \\ f_{yb} &= \sum_{j=1}^2 f_{ybj} = - \sum_{j=1}^2 m_{jc} r_j \omega^2 \cos \theta \\ f_{zb} &= 0 \\ M_{xb} &= \sum_{j=1}^2 - (z_o + l_j) f_{ybj} \\ M_{yb} &= \sum_{j=1}^2 (z_o + l_j) f_{xbj} \\ M_{zb} &= \sum_{j=1}^2 (x_o f_{ybj} - y_o f_{xbj}) \end{aligned} \quad (2)$$

เมื่อ f และ M คือ แรงรวมและโมเมนต์รวมที่เกิดจากมวลถ่วงสมดุล

(2) แบบจำลองของการถ่วงสมดุลแบบแอ็คทีฟ

แบบจำลองของการถ่วงสมดุลแบบแอ็คทีฟจะแสดงดังในรูปที่ 3



รูปที่ 3 แสดงผังวัตถุอิสระของชุดมวลถ่วงสมดุลที่ระนาบ j

$$\begin{aligned} f_{xb} &= \sum_{j=1}^2 f_{xbj} + \sum_{j=3}^4 f_{xbj} \\ &= \sum_{j=1}^2 m_{jc} r_{jc} (\dot{\theta}^2 \sin \theta - \ddot{\theta} \cos \theta) \\ &\quad + \sum_{j=3}^4 m_{jc} r_{jc} [\dot{\theta}^2 \sin(\theta - \alpha_j) + \ddot{\theta} \cos(\theta - \alpha_j)] \\ f_{yb} &= \sum_{j=1}^2 f_{ybj} + \sum_{j=3}^4 f_{ybj} \\ &= - \sum_{j=1}^2 m_{jc} r_{jc} (\dot{\theta}^2 \cos \theta + \ddot{\theta} \sin \theta) \\ &\quad + \sum_{j=3}^4 m_{jc} r_{jc} [\ddot{\theta} \sin(\theta - \alpha_j) - \dot{\theta}^2 \cos(\theta - \alpha_j)] \end{aligned} \quad (4)$$

$$f_{zb} = 0$$

$$\begin{aligned}
M_{xb} &= \sum_{j=1}^2 - (z_o + \ell_j) f_{ybj} + \sum_{j=3}^4 - (z_o + \ell_j) f_{ybj} \\
M_{yb} &= \sum_{j=1}^2 (z_o + \ell_j) f_{xbj} + \sum_{j=3}^4 (z_o + \ell_j) f_{xbj} \\
M_{zb} &= \sum_{j=1}^2 (x_o f_{ybj} - y_o f_{xbj}) + \sum_{j=3}^4 (x_o f_{ybj} - y_o f_{xbj}) \\
&\quad + \sum_{j=1}^2 - m_{jc} r_{jc}^2 \ddot{\theta} + \sum_{j=3}^4 m_{jc} r_{jc}^2 \ddot{\theta}
\end{aligned} \quad (5)$$

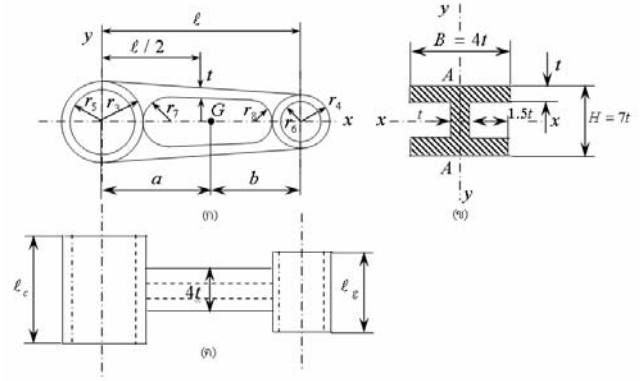
จากเวกเตอร์ของแรงของแบบจำลองทั้งสองจะพบว่าตัวแปรต่อไปนี้มีผลต่อแรงและโมเมนต์ที่กระทำรอบจุดศูนย์กลางมวลของเครื่องยนต์นั้นคือ

- 1) $m_{1c} = m_{2c}$ คือ ขนาดมวลถ่วงสมดุลเมื่อพิจารณาให้มวลถ่วงสมดุลที่ทั้งสองระนาบมีขนาดเท่ากัน
- 2) $r_{1c} = r_{2c}$ คือ ตำแหน่งที่ทำการติดตั้งมวลถ่วงสมดุลเมื่อพิจารณาให้ตำแหน่งที่ระนาบทั้งสองมีขนาดเท่ากัน
- 3) m_B คือ มวลลูกสูบรวมกับมวลสลักลูกสูบ
- 4) m_A คือ มวลสลักแขนข้อเหวี่ยง
- 5) m_G คือ มวลก้านสูบ
- 6) a หรือ b คือ ตำแหน่งจุดศูนย์กลางมวลของก้านสูบ
- 7) J_G คือ โมเมนต์ความเฉื่อยรอบจุดศูนย์กลางมวล G ของก้านสูบ
- 8) ℓ คือ ความยาวของก้านสูบ
- 9) r_{3c} คือ ตำแหน่งติดตั้งมวลถ่วงสมดุลที่ระนาบ 3
- 10) r_{4c} คือ ตำแหน่งติดตั้งมวลถ่วงสมดุลที่ระนาบ 4
- 11) m_{3c} คือ ขนาดของมวลถ่วงสมดุลที่ระนาบ 3
- 12) m_{4c} คือ ขนาดของมวลถ่วงสมดุลที่ระนาบ 4
- 13) α_3 คือ มุมระหว่างกลุ่มมวลหมุนสวนกันที่ระนาบ 1, 4
- 14) α_4 คือ มุมระหว่างกลุ่มมวลหมุนสวนกันที่ระนาบ 2, 3

ตัวแปรที่ 9 – 10 เป็นตัวแปรที่เพิ่มเข้ามาของการถ่วงสมดุลแบบแอ็คทิฟ

เพื่อกำหนดข้อบังคับทางด้านการออกแบบ เราจะทำกาเปลี่ยนตัวแปรที่ 3 ถึง 7 ให้อยู่ในรูปความสัมพันธ์ของตัวแปรทางกายภาพของ ก้านสูบ, สลักลูกสูบ และ สลักก้านสูบ ดังแสดงในรูปที่ 4 ดังนั้นจะเป็นผลให้ตัวแปรการออกแบบของการถ่วงสมดุลแบบจะเป็นดังนี้ $m_{1c} = m_{2c}$, $r_{1c} = r_{2c}$, r_3 , r_4 , r_5 , r_6 , t , ℓ_c , ℓ_g , ℓ , r_9 , r_{3c} , r_{4c} , m_{3c} , m_{4c} , α_3 และ α_4 เมื่อ r_9 คือ รัศมีวงในของสลักก้านสูบ ตัวแปรที่ 11 – 17 คือตัวแปรออกแบบที่เพิ่มขึ้นมาของการถ่วงสมดุลแบบแอ็คทิฟ

จากสมการที่ (1) เมทริกซ์ $[M]$ $[C]$ และ $[K]$ ไม่ได้เป็นเมทริกซ์แถวทแยงมุม สมการดังกล่าวเป็นสมการคู่ควบซึ่งจะต้องแก้โดยใช้วิธีการฐานนิยม (Modal analysis) และแก้หาผลเฉลยในช่วงเวลา $[0, T]$ โดยใช้วิธีการรุงเกตุตา (Runge-Kutta method)



รูปที่ 4 แสดงตัวแปรทางกายภาพของก้านสูบ

3. วิธีการหาค่าเหมาะสมที่สุด

3.1 ฟังก์ชันวัตถุประสงค์

จากวัตถุประสงค์ของการวิจัยที่ต้องการเปรียบเทียบการลดการสั่นสะเทือนในเครื่องยนต์สูบเดียว ด้วยวิธีการถ่วงสมดุลแบบแพสซีฟ และวิธีการถ่วงสมดุลแบบแอ็คทิฟ โดยทำการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเครื่องยนต์สูบเดียว ที่มีการถ่วงสมดุลในทิศทางตรงกันข้ามกับแขนข้อเหวี่ยง ซึ่งจัดเป็นการถ่วงสมดุลแบบแพสซีฟ และสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ของเครื่องยนต์สูบเดียวที่มีการถ่วงสมดุลโดยใช้กลุ่มมวลหมุนสวนกัน ซึ่งจัดเป็นการถ่วงสมดุลแบบแอ็คทิฟ ประยุกต์ใช้วิธีการหาค่าเหมาะสมที่สุดเพื่อให้การสั่นสะเทือนมีค่าต่ำสุด ปัญหาการหาค่าเหมาะสมที่สุดจะเป็นปัญหาการหาค่าต่ำสุดการสั่นสะเทือนของเครื่องยนต์สูบเดียวที่รอบการทำงาน ของเครื่องยนต์ ต่างๆ กัน นั่นคือ 1000 1500 2000 3000 และ 4000 รอบต่อนาที การสั่นสะเทือนที่พิจารณาจะพิจารณาเฉพาะการสั่นสะเทือนในทิศทางตั้งฉากกับฐานและทิศทางรอบแกนขนาน แกนเพลลาข้อเหวี่ยง แต่เนื่องจากการสั่นสะเทือนเป็นฟังก์ชันคาบของมุมแขนข้อเหวี่ยง ซึ่งจะเป็นผลให้สัญญาณการสั่นสะเทือนจะมีค่าทั้งบวกและลบเปลี่ยนแปลงตามเวลา การวัดขนาดสัญญาณการสั่นสะเทือนนิยมวัดในลักษณะของขนาดโดยรวมในช่วงเวลา $[0, T]$ ซึ่งในงานวิจัยนี้จะเลือกใช้ค่ารากเฉลี่ยกำลังสอง

$$x_{rms} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T x^2(t) dt} \quad (6)$$

ดังนั้น ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของการหาค่าเหมาะสมที่สุดจะเป็นดังนี้

$$y_{rms} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T y^2(t) dt} \quad (7)$$

$$\theta_{z,rms} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T \theta_{z,rms}^2(t) dt} \quad (8)$$

โดยที่คาบเวลาในการหาค่าเชิงตัวเลขนั้นจะพิจารณาเพียงหนึ่งรอบการทำงานของเครื่องยนต์ที่สภาวะเปลี่ยนแปลง

3.2 ฟังก์ชันข้อบังคับ

ฟังก์ชันข้อบังคับจะประกอบด้วยข้อบังคับด้านการออกแบบและตัวแปรอื่นๆ เช่น ตำแหน่งและขนาดของมวลถ่วงสมดุล มุมระหว่างคู่มวลหมุน มวลของสลักแกนข้อเหวี่ยง และมวลของลูกสูบและสลักก้านสูบ

3.3 ตัวแปรออกแบบ

ในหัวข้อที่ 2 เราได้เปลี่ยนตัวแปรออกแบบทางกายภาพไปเป็นตัวแปรออกแบบทางด้านรูปร่างเช่นรูปร่างของก้านสูบ สลักลูกสูบและสลักแกนข้อเหวี่ยง เป็นต้น ซึ่งเป็นผลให้การถ่วงสมดุลแบบแพสซีฟจะมีตัวแปรในการออกแบบทั้งหมด 11 ตัว ขณะที่ตัวแปรในการออกแบบของการถ่วงสมดุลแบบแอ็คทีฟจะมีตัวแปรในการออกแบบทั้งหมด 17 ตัว

3.4 วิธีการข้อบังคับตั้งฉากไว้มิติตัดแปลง

ปัญหาการหาค่าเหมาะสมที่สุดเป็นปัญหาการหาค่าต่ำสุดของการสั่นสะเทือนของเครื่องยนต์สูบเดียวในทิศทาง y และ θ_z ที่ความเร็วรอบต่างๆ กัน ปัญหาดังกล่าวเป็นปัญหาการหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบหลายฟังก์ชันเป้าหมาย เซตของผลเฉลยที่เหมาะสมที่สุดของพาราโบลสามารถหาได้โดยใช้วิธีการข้อบังคับตั้งฉากไว้มิติตัดแปลง วิธีการดังกล่าวเป็นวิธีการที่ตัดแปลงจากวิธีการข้อบังคับตั้งฉากไว้มิติ [7] วิธีการดังกล่าวนี้ไม่ได้สร้างเฉพาะผลเฉลยวงกว้างของพาราโบลแต่สามารถจัดผลเฉลยเฉพาะที่ได้โดยใช้วิธีการพาราโบลฟิลเตอร์

3.5 การหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบฟังก์ชันเป้าหมายเดียว

วิธีการข้อบังคับตั้งฉากไว้มิติตัดแปลงเป็นวิธีการที่เปลี่ยนปัญหาการหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบหลายฟังก์ชันเป้าหมายไปเป็นปัญหาการหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบฟังก์ชันเป้าหมายเดียวโดยการเพิ่มฟังก์ชันข้อบังคับ ปัญหาการหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบฟังก์ชันเป้าหมายเดียวสามารถแก้หาผลเฉลยโดยใช้อัลกอริธึมซีเคเวนเซียลควอดเทรติก (SQP) ผลเฉลยที่ได้คือผลเฉลยของปัญหาการหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบหลายฟังก์ชันเป้าหมาย

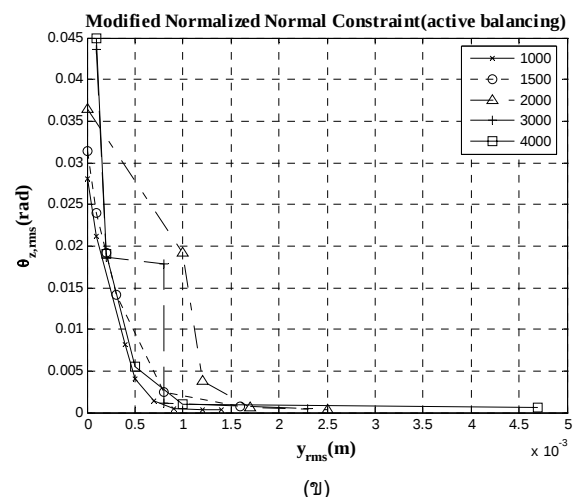
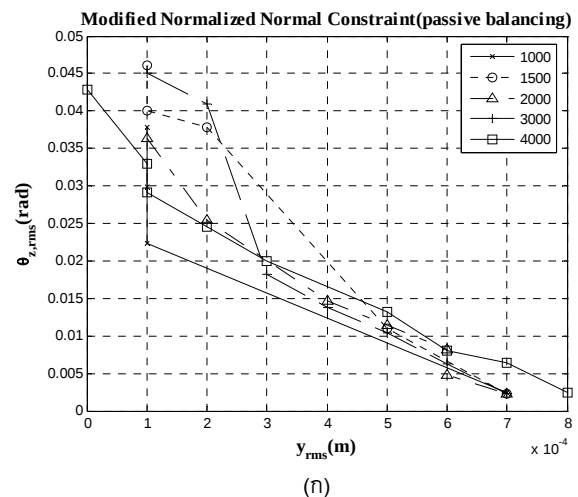
4. ผลการหาค่าเหมาะสมที่สุด

ข้อมูลเครื่องยนต์และเงื่อนไขการทำงานจะแสดงดังในตารางที่ 1 ผลเฉลยของการหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบหลายฟังก์ชันเป้าหมายของการลดการสั่นสะเทือนในเครื่องยนต์สูบเดียว ในทิศทาง y และ θ_z เมื่อมีการถ่วงสมดุลแบบแพสซีฟ และแอ็คทีฟจะแสดงดังในรูปที่ 5 และผลการเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์การลดการสั่นสะเทือนสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 6 ผลเฉลยของการหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบหลายฟังก์ชันเป้าหมายของการลดการสั่นสะเทือนในเครื่องยนต์สูบเดียว ในทิศทาง y และ θ_z เมื่อมีการถ่วงสมดุลแบบแพสซีฟ และแอ็คทีฟดังแสดงในรูปที่ 5 จะเห็นว่าเซตของผลเฉลยที่ได้จากการถ่วงสมดุลแบบแพสซีฟจะมีสภาพนูนออก (convex) และสภาพโค้งเข้า (concave) น้อยกว่าเซตของผลเฉลยที่ได้จากการถ่วงสมดุลแบบแอ็คทีฟซึ่งเป็นผลมาจาก

ความซับซ้อนในการถ่วงสมดุลแบบแอ็คทีฟจะมีมากกว่าการถ่วงสมดุลแบบแพสซีฟ

ตารางที่ 1 ข้อมูลเครื่องยนต์และเงื่อนไขการทำงาน

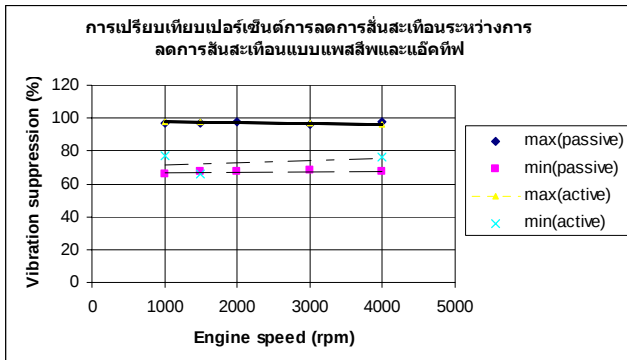
m-total engine mass	14.528 kg	
mp-piston mass	0.2 kg	
r-crank mass	0.0225 m	
Damping ratio	0.05	
x_0, y_0, z_0	-0.0232, -0.076, 0.01m	
ω = engine angular velocity:		
Idle speed	1000, 1500, 2000, 3000, 4000 rpm	
Moment of Inertia:		
$I_{xx} = 0.0768, I_{yy} = 0.064, I_{zz} = 0.0812, I_{xy} = 0, I_{yz} = 0, I_{zx} = 0$ kg-m ²		
Mount positions:		
$x_{m1} = -0.084$ m	$y_{m1} = -0.0985$ m	$z_{m1} = 0.0785$ m
$x_{m2} = -0.084$ m	$y_{m2} = -0.0985$ m	$z_{m2} = 0.0785$ m
$x_{m3} = -0.084$ m	$y_{m3} = -0.0985$ m	$z_{m3} = 0.0785$ m
$x_{m4} = -0.084$ m	$y_{m4} = -0.0985$ m	$z_{m4} = -0.0785$ m
Mount stiffnesses:		
$k_{xm1} = 900$ N/m	$k_{ym1} = 900$ N/m	$k_{zm1} = 900$ N/m
$k_{xm2} = 900$ N/m	$k_{ym2} = 900$ N/m	$k_{zm2} = 900$ N/m
$k_{xm3} = 900$ N/m	$k_{ym3} = 900$ N/m	$k_{zm3} = 900$ N/m
$k_{xm4} = 900$ N/m	$k_{ym4} = 900$ N/m	$k_{zm4} = 900$ N/m



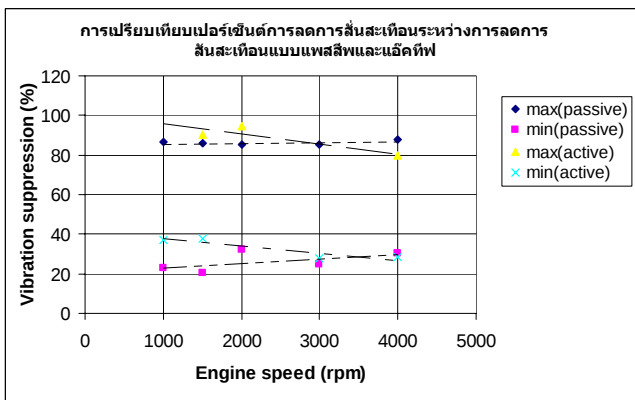
รูปที่ 5 แสดงผลของการลดการสั่นสะเทือนในเครื่องยนต์สูบเดียวในทิศทาง y และ θ_z ที่ความเร็วรอบต่าง

(ก) กรณีการลดการสั่นสะเทือนแบบแพสซีฟ

(ข) กรณีการลดการสั่นสะเทือนแบบแอ็คทีฟ



(ก)



(ข)

รูปที่ 6 (ก) แสดงเปอร์เซ็นต์การลดการสั่นสะเทือนในทิศทาง y เปรียบเทียบระหว่างการถ่วงสมดุลแบบพาสซีฟและแอคทีฟ

(ข) แสดงเปอร์เซ็นต์การลดการสั่นสะเทือนในทิศทาง θ_z เปรียบเทียบระหว่างการถ่วงสมดุลแบบพาสซีฟและแอคทีฟ

ขณะที่รูปที่ 6 แสดงการเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์การลดการสั่นสะเทือนโดยวิธีการถ่วงสมดุลแบบพาสซีฟและแอคทีฟในทิศทาง y และ θ_z โดยคิดเปอร์เซ็นต์การลดการสั่นสะเทือนต่ำสุดและสูงสุดที่รอบการทำงานต่างๆ กัน จากการศึกษาพบว่าวิธีการถ่วงสมดุลแบบแอคทีฟจะสามารถลดการสั่นสะเทือนในทิศทาง y และ θ_z ได้ดีแต่กลับมีผลในการเพิ่มการสั่นสะเทือนในทิศทางอื่น ดังนั้นก่อนที่จะพิจารณาเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์การลดการสั่นสะเทือนจะต้องตัดผลเฉลยที่มีผลให้เกิดการเพิ่มการสั่นสะเทือนในทิศทางอื่นๆ ดังนั้นจะเห็นว่าที่บางความเร็วรอบจะไม่ได้แสดงเปอร์เซ็นต์การลดการสั่นสะเทือนไว้ ดังแสดงในรูปที่ 6

5. สรุป

จากผลการศึกษาพบว่าวิธีการถ่วงสมดุลแบบพาสซีฟจะให้ผลในการลดการสั่นสะเทือนในทิศทาง y เป็น 67 - 97 % และ θ_z เป็น 26 - 86 % เมื่อเทียบกับการออกแบบที่คำนึงถึงความแข็งแรงแต่เพียงอย่างเดียว ขณะที่การถ่วงสมดุลแบบแอคทีฟจะให้ผลในการลดการสั่นสะเทือนในทิศทาง y เป็น 73 - 97 % และ θ_z เป็น 32 - 88 % เมื่อเปรียบเทียบกับ การออกแบบที่คำนึงถึงความแข็งแรงแต่เพียงอย่างเดียว

เดี่ยว จะเห็นว่าวิธีการถ่วงสมดุลแบบแอคทีฟจะสามารถลดการสั่นสะเทือนได้มากกว่าการถ่วงสมดุลแบบพาสซีฟ แต่จะต้องมีการพิจารณาถึงการเพิ่มการสั่นสะเทือนในทิศทางอื่นๆ เข้ามาประกอบด้วย ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าวิธีการถ่วงสมดุลแบบแอคทีฟจะให้ผลในการลดการสั่นสะเทือนได้ดีกว่าวิธีการถ่วงสมดุลแบบพาสซีฟ

เอกสารอ้างอิง

- [1] Lowen, G.G., Tepper, F.R. and Berkof, R.S. 1983. Balancing of linkages-an Update. Mechanism and Machine Theory. Vol. 18, pp. 213-220.
- [2] Zhang, S.M. and Chen, J.H. 1994. The Optimum Balance of Shaking Force and Shaking Moment of Linkage. Mechanism and Machine Theory. Vol. 30, pp. 589-597.
- [3] Snyman, J.A. , Heyns, P.S. and Vermeulen, P.J. 1995. Vibration Isolation of a Mounted Engine Through Optimization. Mechanism and Machine Theory. Vol. 30, pp. 109-118.
- [4] Chiou, S.T. , Bai, G.J. and Chang, W.K. 1998. Optimum Balancing Designs of the Drag-link Drive of Mechanical Presses for Precision Cutting. Int. J. Mach. Tools Manufact. Vol. 38, pp. 131-141.
- [5] Suwin, S., Jumlong L., and Sujin B. 2004. Multiobjective Optimization of a Single-Cylinder Engine. Engineering Innovation for Sustainable Resources Management, Khon Kaen, Thailand, Jan.23-24, p.71.
- [6] Suwin, S., 2006. Vibration Suppression of a Single Cylinder Engine. Engineering Innovation for Sustainable Resources Management, Khon Kaen, Thailand, Jan.25-26, p. 65.
- [7] Messac, A. , Ismail-Yahaya, A and Mattson, C.A. 2002. The Normalized Normal Constraint Method for Generating the Pareto Frontier. Structural and Multidisciplinary Optimization (to be published).