

แบบจำลองเพื่อประเมินกำลังสูญเสียจากการส่งกำลังด้วยเฟืองตรง

Gear Meshing Model for Estimation of Power Loss in Spur Gear Transmission

ชนัดต์ รัตนสุมาวงศ์*, ศิริพงษ์ ลิ้มปรีชาญา, พงศ์ธร จุณณะภาต และ ภัทรพงษ์ โรจนพรหมทิพย์

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ถนนพญาไท เขตปทุมวัน กรุงเทพฯ 10330

โทร 0-2218-6593 *อีเมล chanat.r@eng.chula.ac.th

บทคัดย่อ

ฟันเฟืองถูกออกแบบให้มีผิวโค้งอินวอลูต เพื่อให้สามารถส่งกำลังด้วยอัตราทดที่ถูกต้องตลอดเวลา อย่างไรก็ตามรูปร่างของฟันเฟืองทำให้เกิดการไถลของฟันคู่ที่ขบกัน ส่งผลให้เกิดกำลังสูญเสียขึ้นโดยไม่สามารถหลีกเลี่ยงได้ กำลังสูญเสียนี้อาจเพิ่มมากขึ้นเมื่อต้องใช้เฟืองทดรอบหลายๆ ระดับ เช่นระบบเฟืองในการส่งกำลังของรถไถที่ใช้ในการเกษตร ซึ่งจำเป็นต้องมีอัตราทดสูง เพื่อให้สอดคล้องกับการทำงานของอุปกรณ์ต่อพ่วง ความเข้าใจถึงกลไกการเกิดกำลังสูญเสียในเฟืองช่วยให้สามารถออกแบบเฟืองที่มีประสิทธิภาพการส่งกำลังสูงขึ้นได้

บทความนี้เสนอแบบจำลองเพื่อประเมินกำลังสูญเสียจากการไถลของฟันของเฟืองตรง การคำนวณจะเริ่มจากการประเมินกำลังสูญเสียของฟันคู่ที่ขบกันเพียงคู่เดียวก่อน โดยกำลังสูญเสียในแบบจำลองนี้เกิดจากทิศทางของแรง ซึ่งเบี่ยงเบนไปจากเส้นแนวแรงกระทำเนื่องจากแรงเสียดทานของพื้นผิว หลังจากนั้นจะขยายเป็นการประเมินในกรณีขบพร้อมๆ กัน 2 ฟัน เพื่อให้สอดคล้องกับการขบกันจริงของเฟืองตรง ซึ่งในแต่ละช่วงเวลาจะมีจำนวนฟันที่ขบเปลี่ยนแปลงระหว่าง 1 ถึง 2 ฟัน เมื่อเปรียบเทียบผลการประเมินกำลังสูญเสียที่ได้จากแบบจำลองนี้กับผลการวัดกำลังสูญเสียซึ่งทำโดยนักวิจัยอื่น พบว่ามีแนวโน้มสอดคล้องกัน เมื่อเพิ่มความเร็วยรอบหมุนและแรงบิด กำลังสูญเสียนี้อาจมีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้น และเมื่อเปรียบเทียบกำลังสูญเสียของเฟืองที่มีอัตราทดและขนาดเฟืองเท่ากันแต่มีโมดูลต่างกัน พบว่าเฟืองที่มีขนาดฟันใหญ่กว่ามีแนวโน้มมีกำลังสูญเสียมากกว่า

คำหลัก เฟืองตรง กำลังสูญเสียจากการไถลของฟัน

Abstract

Gear tooth is designed to have involute profile, for power can be transmitted at accurate ratio consistently. However involute profile leads to sliding between meshing tooth surface and consequentially brings about power loss unavoidably. Power loss increases significantly when multiple-stage of gear reduction is used, for example a transmission system in an agricultural tractor that usually has high gear ratio to suit with the operation

of attached implements. The understanding of the mechanism of gear-power loss is very useful for gear design and development.

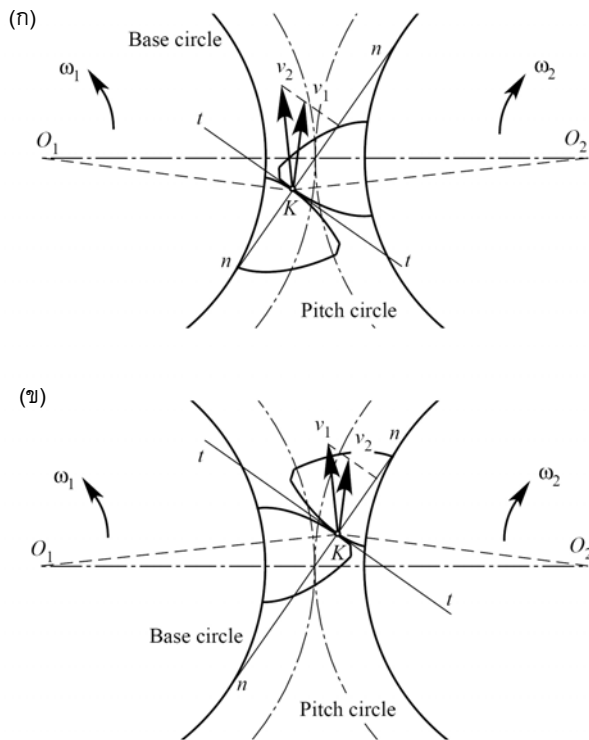
This paper proposes a model for estimating spur gear power loss due to sliding of tooth surfaces. First the power loss in the case of single tooth meshing is considered. The power loss in this model is attributed to the deviation in direction of force from the line of action due to the effect of friction. Next the power loss during double teeth meshing is considered. The estimated power losses were compared with the experimental results done by the other researchers. The estimated results agree well with experimental results. The power losses tend to increase with increasing rotational speed and applied torque. In the case of the gear pair with the same gear ratio, the power loss of gear having larger teeth is larger than gear having smaller teeth.

Key words Spur gear, sliding loss

1. บทนำ

เฟืองเป็นส่วนส่วนกลที่ใช้ในการส่งถ่ายกำลังและการเคลื่อนที่ โดยปกติรูปร่างของฟันเฟืองถูกออกแบบให้มีผิวโค้งอินวอลูต เพื่อให้สามารถส่งกำลังด้วยอัตราทดที่ถูกต้องตลอดเวลา อย่างไรก็ตามรูปร่างของฟันเฟืองทำให้เกิดการไถลของฟันคู่ที่ขบกันขึ้น แรงเสียดทานจากการไถลนี้ก่อให้เกิดกำลังสูญเสียขึ้นโดยไม่สามารถหลีกเลี่ยงได้ และกำลังสูญเสียจะถูกแปรสภาพไปเป็นความร้อน ก่อให้เกิดความเสียหายต่อผิวเฟืองได้ กำลังสูญเสียนี้อาจเพิ่มมากขึ้นเมื่อใช้เฟืองทดรอบหลายๆ ระดับ เช่นระบบเฟืองในการส่งกำลังของรถไถที่ใช้ในการเกษตร ซึ่งจำเป็นต้องมีอัตราทดสูง และต้องมีหลายเกียร์ความเร็ว เพื่อใช้งานกับอุปกรณ์การเกษตรหลายๆ ชนิด ความเข้าใจถึงกลไกการเกิดกำลังสูญเสียช่วยให้สามารถพัฒนาการออกแบบเฟืองให้มีประสิทธิภาพการส่งกำลังสูงขึ้น ช่วยประหยัดพลังงานโดยเฉพาะอย่างยิ่งในปัจจุบันซึ่งราคาน้ำมันเชื้อเพลิงมีแนวโน้มสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง

จากความสำคัญ และความต้องการเพิ่มประสิทธิภาพในการส่งกำลังโดยเฟืองนี้ จึงมีงานวิจัยมากมายที่เกี่ยวข้องกับกำลังสูญเสีย และ



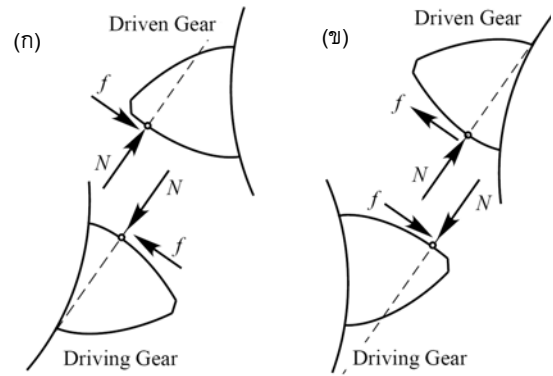
รูปที่ 1 การไถลของฟันเฟือง

ประสิทธิภาพของเฟือง เช่น งานวิจัยของ Michlin และ Myunster [1] ซึ่งกล่าวถึงการสร้างแบบจำลอง เพื่อแสดงกลไกการเกิดกำลังสูญเสียในเฟืองตรงขึ้น อย่างไรก็ตามแบบจำลองนี้แสดงถึงกำลังสูญเสียที่เกิดขึ้นเนื่องจากการขบกันของฟันเฟือง 1 คู่เท่านั้น ซึ่งไม่สอดคล้องกับการทำงานจริงของเฟืองตรง ซึ่งมีจำนวนฟันที่ขบกันในแต่ละช่วงเวลา 1 หรือ 2 ฟัน นอกจากนี้งานวิจัยนี้ยังไม่ได้แสดงการเปรียบเทียบผลจากแบบจำลอง กับผลการทดลองวัดกำลังสูญเสียของเฟืองตรง Petry-Johnson และคณะ [2] ได้ทำการวัดกำลังสูญเสียของเฟืองตรงที่ความเร็วรอบ และภาระการทำงานต่างๆ และได้ทดสอบถึงผลของขนาดของฟันเฟืองต่อกำลังสูญเสียที่เกิดขึ้น อย่างไรก็ตามกลไกการเกิดกำลังสูญเสียไม่ได้กล่าวถึงในงานวิจัยนี้

บทความนี้แสดงการพัฒนาแบบจำลองกำลังสูญเสียของ Michlin และ Myunster ให้สามารถใช้ได้ในขณะการขบของฟันเฟืองขึ้น 2 ฟันพร้อมๆ กัน ซึ่งสอดคล้องกับการทำงานจริงของเฟืองตรง ผลการทำนายกำลังสูญเสียจากแบบจำลองที่สร้างขึ้น จะนำไปเปรียบเทียบกับผลการวัดกำลังสูญเสียซึ่งทำโดย Petry-Johnson และคณะ ต่อไป

2. กำลังสูญเสียในการขบกันของเฟือง

กำลังสูญเสียในการขบกันของเฟืองสามารถแบ่งได้เป็น 2 ประเภทใหญ่ๆ คือ 1) กำลังสูญเสียที่ขึ้นกับขนาดของภาระ ได้แก่ กำลังสูญเสียเนื่องจากแรงเสียดทานจากการไถล และการกลิ้งของฟันระหว่างการขบ และ 2) กำลังสูญเสียซึ่งไม่ขึ้นกับภาระ ได้แก่ กำลังสูญเสียจากการหมุน สำหรับการงานที่ความเร็วรอบหมุนต่ำๆ และขนาดของเฟืองไม่ใหญ่นัก กำลังสูญเสียส่วนใหญ่จะเกิดเนื่องจากแรงเสียดทานจากการไถล



รูปที่ 2 แรงที่กระทำบนฟันเฟือง

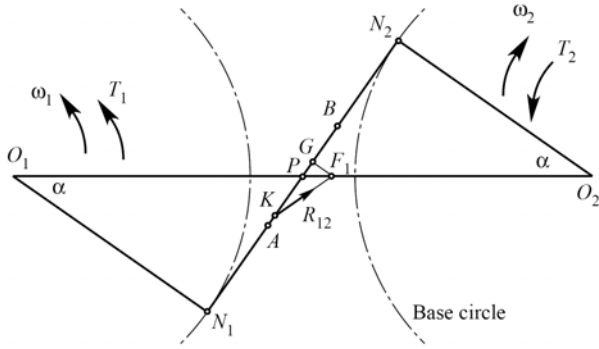
โดยกำลังสูญเสียจากแรงเสียดทานเนื่องจากการกลิ้ง และกำลังสูญเสียจากการหมุนมีค่าน้อยกว่ามาก [1-2] สำหรับการสร้างแบบจำลองเพื่อประเมินกำลังสูญเสียในบทความนี้ จะคิดเฉพาะกำลังสูญเสียเนื่องจากการไถล ซึ่งเพียงพอต่อการประเมินในสภาวะการทำงานที่ความเร็วรอบหมุนเฟืองไม่สูงนัก

กำลังสูญเสียเนื่องจากการไถล

กำลังสูญเสียจากการไถลเกิดจากการที่ฟันเฟืองขบกันแต่ความเร็วสัมผัสไม่เท่ากัน จึงเกิดกำลังสูญเสียไปกับแรงเสียดทานจากการไถล การเกิดกำลังสูญเสียจากการไถลสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 1 เฟือง O_1 หมุนรอบ O_2 โดยจุด K เป็นจุดที่ฟันเฟืองสัมผัสกัน ความเร็วที่จุดสัมผัสของเฟือง O_1 และเฟือง O_2 เป็น v_1 และ v_2 ตามลำดับ จากรูปจะพบว่า เวกเตอร์ความเร็วในแนวแกน n ของเฟืองทั้งสองตัวต้องมีค่าเท่ากันเพื่อให้ฟันของเฟืองขบ และเฟืองตามสัมผัสกันตลอดช่วงการขบ อย่างไรก็ตามเวกเตอร์ความเร็วในแกน t จะมีค่าต่างกัน ซึ่งทำให้เกิดการไถล และแรงเสียดทานเนื่องจากการไถลขึ้น

จากรูปที่ 1(ก) และ (ข) จะพบว่าความเร็วการไถลมีการเปลี่ยนแปลงเมื่อตำแหน่งการขบเปลี่ยนไป ส่งผลให้กำลังสูญเสียในแต่ละช่วงเวลาจะมีค่าไม่คงที่ด้วย โดยอัตราเร็วที่จุดสัมผัสของเฟืองตามจะมีค่ามากกว่าเฟืองขับในตอนแรก เมื่อตำแหน่งขบเลยจุดพิชิตซ์ไปแล้ว อัตราเร็วของเฟืองขับจะมากกว่าเฟืองตาม นอกจากนี้ยังพบว่าที่ตำแหน่งการขบห่างจากจุดพิชิตซ์มากจะยังมีความเร็วการไถลมาก จึงมีกำลังสูญเสียมากกว่าการขบที่ใกล้ๆ จุดพิชิตซ์ สำหรับที่จุดพิชิตซ์ความเร็วสัมผัสของเฟืองทั้งคู่มีค่าเท่ากัน จึงไม่เกิดการไถลขึ้น

รูปที่ 2(ก) และ (ข) แสดงแรงที่กระทำที่ผิวฟันเฟืองแต่ละตัวเมื่อตำแหน่งการขบต่างกัน จากรูปที่แสดงแรงเสียดทานในช่วงเริ่มต้นการขบก่อนจะถึงจุดพิชิตซ์ และเมื่อตำแหน่งการขบเลยจุดพิชิตซ์ไปแล้วมีทิศทางตรงกันข้ามกัน เนื่องจากทิศทางของความเร็วการไถลจะตรงข้ามกัน สำหรับที่จุดพิชิตซ์ เนื่องจากไม่มีการไถลเกิดขึ้นจึงไม่มีแรงเสียดทานจากการไถล



รูปที่ 3 แรงที่กระทำกับเฟืองตามระหว่างกรขบ

ตารางที่ 1 การแทนเครื่องหมายของค่าต่างๆ สำหรับสมการ (13)

Parameter	N_1P	PN_2
μ	+	-
n	-	+

3. แบบจำลองเพื่อประเมินกำลังสูญเสียของเฟืองตรง

3.1 อัตราส่วนกำลังสูญเสียจากการขบกันของฟัน 1 คู่

รูปที่ 3 แสดงแรงที่เกิดขึ้นกับเฟืองตามระหว่างกรขบ เฟืองขับมีจุดศูนย์กลางอยู่ที่ O_1 และมีรัศมีวงกลมเบส O_1N_1 ส่วนเฟืองตามมีจุดศูนย์กลางอยู่ที่ O_2 และมีรัศมีวงกลมเบส O_2N_2 ในการขบกันของเฟืองจะเริ่มต้นที่จุด A ซึ่งเป็นจุดที่รากฟันของเฟืองขับเริ่มขบกับปลายฟันของเฟืองตาม จุดสัมผัสจะค่อยๆ เคลื่อนไปตามเส้นแนวแรงกระทำ (Line of action หรือ Pressure angle line) N_1N_2 ซึ่งมีมุมกด (Pressure angle) α และจะสิ้นสุดการขบที่จุด B ซึ่งเป็นจุดที่ปลายฟันของเฟืองขับขบกับรากฟันของเฟืองตาม ในระหว่างการขบกันฟันของเฟืองขับจะส่งกำลังไปยังฟันของเฟืองตาม โดยแรง R_{12} เป็นแรงที่เฟืองขับกระทำกับเฟืองตาม ด้วยทิศทางที่ทำมุมกับเส้นแนวแรงกระทำ μ ซึ่งเป็นผลมาจากแรงเสียดทาน ในแบบจำลองนี้จะสมมุติให้การสัมผัสของฟันเฟืองเป็นแนวเส้นตรงตามแนวความกว้างของฟัน ซึ่งจะเห็นแนวสัมผัสเป็นจุด เมื่อพิจารณาเป็นปัญหา 2 มิติ สำหรับในรูปฟันเฟืองสัมผัสกันที่จุด K อัตราส่วนกำลังสูญเสีย φ หาได้จากความสัมพันธ์ของกำลังเข้า H_1 กำลังออก H_2 และกำลังสูญเสีย H_3 ดังสมการ (1)

$$\varphi = \frac{H_3}{H_1} = \frac{H_1 - H_2}{H_1} \quad (1)$$

เนื่องจากกำลัง H หาได้จากผลคูณของแรงบิด T และความเร็วรอบหมุนของเฟือง ω ดังนั้นจะสามารถเขียนกำลังเข้าและกำลังออกได้ดังนี้

$$H_1 = T_1\omega_1 = R_{12} \cdot \overline{O_1F_1} \cdot \cos(\alpha + \mu) \cdot \omega_1 \quad (2)$$

$$H_2 = T_2\omega_2 = R_{12} \cdot \overline{O_2F_1} \cdot \cos(\alpha + \mu) \cdot \omega_2 \quad (3)$$

แทนสมการ (2) และ (3) ลงในสมการ (1) จะได้

$$\varphi = 1 - \frac{H_2}{H_1} = 1 - \frac{\overline{O_2F_1}}{\overline{O_1F_1}} \cdot \frac{\omega_2}{\omega_1} \quad (4)$$

$$\varphi = 1 - \frac{\overline{O_2F_1}}{\overline{O_1F_1}} \cdot m$$

โดย m คืออัตราทดของคู่เฟือง

สมการ (4) สามารถจัดรูปใหม่ได้ดังนี้

$$\varphi = 1 - \left(\frac{\overline{PO_2} - \overline{PF_1}}{\overline{PO_1} + \overline{PF_1}} \right) \cdot m = 1 - \left(\frac{\overline{PO_1}/\overline{PF_1} - m}{\overline{PO_1}/\overline{PF_1} + 1} \right) \quad (5)$$

$$\varphi = \frac{1+m}{1+\overline{PO_1}/\overline{PF_1}}$$

กำหนดให้

$$M = \frac{\overline{PO_1}}{\overline{PF_1}} \quad (6)$$

ดังนั้นสมการ (5) จะเขียนได้ดังนี้

$$\varphi = \frac{1+m}{1+M} \quad (7)$$

พิจารณาสามเหลี่ยม O_1N_1P และสามเหลี่ยม PF_1G ซึ่งเป็นสามเหลี่ยมที่คล้ายกัน จะได้ความสัมพันธ์ดังนี้

$$M = \frac{\overline{PO_1}}{\overline{PF_1}} = \frac{\overline{O_1N_1}}{\overline{F_1G}} \quad (8)$$

ค่า M ในสมการ (8) จะหาได้เมื่อทราบระยะ $\overline{F_1G}$ และ $\overline{O_1N_1}$ พิจารณาสามเหลี่ยม KGF_1 จะได้ความสัมพันธ์ดังนี้

$$\overline{F_1G} = (\overline{KP} + \overline{F_1G} \cdot \tan \alpha) \cdot \tan \mu$$

$$\overline{F_1G} = \frac{\overline{KP} \cdot \tan \mu}{1 - \tan \alpha \cdot \tan \mu} \quad (9)$$

กำหนดให้ n เป็นอัตราส่วน ซึ่งแสดงตำแหน่งการขบเทียบกับระยะ $\overline{N_1P}$ ดังแสดงในสมการ

$$n = \frac{\overline{KP}}{\overline{N_1P}} \quad (10)$$

โดย ในช่วงการขบก่อนที่จะถึงจุดพิตช์ ค่า n จะมีค่าเป็นลบ ส่วนในช่วงการขบหลังจากจุดพิตช์ไปแล้ว n จะมีค่าเป็นบวก

พิจารณาสามเหลี่ยม O_1N_1P และใช้ความสัมพันธ์ในสมการ (10) จะสามารถหาระยะ $\overline{O_1N_1}$ ได้ดังนี้

$$\overline{O_1N_1} = \frac{\overline{N_1P}}{\tan \alpha} = \frac{\overline{KP}}{-n \tan \alpha} \quad (11)$$

แทนสมการ (9) และ (11) ลงในสมการ (8) จะหาค่า M ได้ดังสมการ (12)

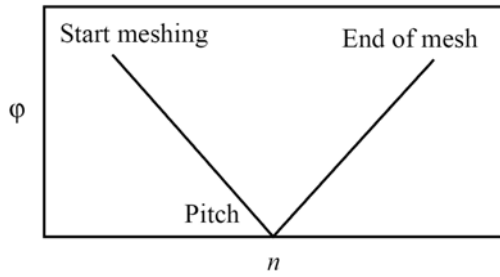
$$M = \frac{1 - \tan \alpha \cdot \tan \mu}{-n \cdot \tan \alpha \cdot \tan \mu} \quad (12)$$

แทนค่า M ลงในสมการ (7) จะสามารถหาอัตราส่วนกำลังสูญเสียได้ดังนี้

$$\varphi = \frac{-n \cdot \tan \alpha \cdot \tan \mu \cdot (1+m)}{1 - (n+1) \cdot \tan \alpha \cdot \tan \mu} \quad (13)$$

เนื่องจากทิศทางของแรงเสียดทานจะเปลี่ยนแปลง ขึ้นกับตำแหน่งการขบ ดังแสดงในรูปที่ 2 ดังนั้นการแทนเครื่องหมายของตัวแปรในสมการ (13) จึงต้องแทนให้ถูกต้องดังแสดงในตารางที่ 1

รูปที่ 4 แสดงความสัมพันธ์ของอัตราส่วนกำลังสูญเสียที่ตำแหน่งการขบต่างๆ ซึ่งคำนวณได้จากสมการ (13) จากรูปพบว่ากำลังสูญเสียจะมีค่ามากที่สุดบริเวณห่างจากตำแหน่งพิตช์ และมีค่าน้อยลงจนกระทั่ง



รูปที่ 4 อัตราส่วนกำลังสูญเสียที่ตำแหน่งการขบต่างๆ ของฟัน 1 คู่

เท่ากับศูนย์ที่จุดพิชท์ ซึ่งไม่เกิดการไถลเนื่องจากความเร็วสัมผัสของฟันทั้งคู่มีค่าเท่ากัน

3.2 อัตราส่วนกำลังสูญเสียรวม

อัตราส่วนกำลังสูญเสียที่หาได้จากสมการ (13) และแสดงในรูปที่ 4 นั้น เป็นอัตราส่วนกำลังสูญเสียอันเนื่องมาจากการไถลกันของฟันเฟืองเพียงคู่เดียว และการส่งกำลังเกิดโดยฟันคู่นี้เพียงคู่เดียวเท่านั้น แต่ในความเป็นจริงแล้วในแต่ละช่วงเวลาเฟืองอาจจะขบกันมากกว่า 1 ฟันได้ อันจะเห็นได้จากอัตราส่วนการขบ ซึ่งในกรณีของเฟืองตรงมักมีค่าอยู่ในช่วง 1.5 ถึง 1.8 อัตราส่วนการขบนี้หมายความว่าในบางขณะเฟืองอาจจะขบกันเพียงแค่ฟันเดียว และในบางขณะเฟืองจะขบกันสองฟัน ด้วยเหตุนี้อัตราส่วนกำลังสูญเสียจึงต้องคิดค่ารวม ให้สอดคล้องกับการขบกันจริงของฟันเฟืองด้วย

รูปที่ 5(ก) แสดงถึงอัตราส่วนกำลังสูญเสียที่เกิดขึ้นจากฟันเฟืองแต่ละคู่ตามลำดับการขบที่ช่วงเวลา (ตำแหน่งการขบ) ต่างๆ ช่วงเวลาที่มีกราฟเพียงเส้นเดียวหมายถึง ในขณะนั้นเฟืองขบกันเพียงแค่ฟันเดียว ส่วนช่วงเวลาที่กราฟซ้อนกันหมายถึงในขณะนั้นฟันเฟืองมีการขบกัน 2 ฟัน อัตราส่วนกำลังสูญเสียในขณะที่มีฟัน 2 คู่ขบกันสามารถหาได้โดยประมาณให้เฟือง 2 คู่ส่งกำลังเท่ากัน โดยกำลังที่ฟันแต่ละคู่ส่งถ่ายหาได้จาก

$$H_{Z1} = H_{Z2} = \frac{H_1}{2} \quad (14)$$

โดย ตัวห้อย Z1 และ Z2 หมายถึงฟันคู่ที่ 1 และฟันคู่ที่ 2 ตามลำดับอัตราส่วนกำลังสูญเสียในขณะที่มีฟันสองฟัน φ_{Total} หาได้จาก

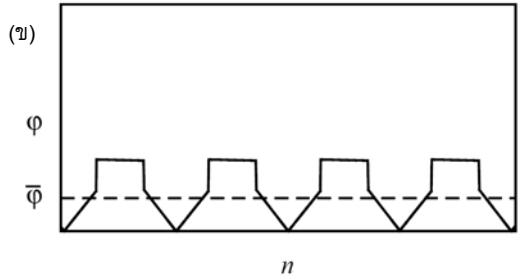
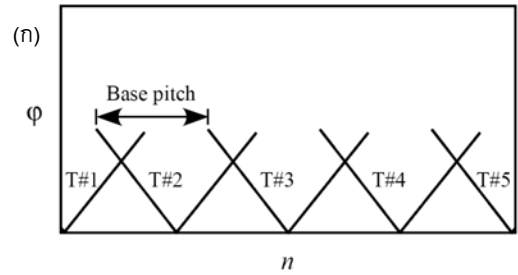
$$\varphi_{Total} = \frac{(Loss_{Z1} + Loss_{Z2})}{H_1} \quad (15)$$

กำลังสูญเสียรวมทั้งสองฟันหาได้จาก

$$\begin{aligned} \varphi_{Total} \cdot H_1 &= Loss_{Z1} + Loss_{Z2} \\ \varphi_{Total} \cdot H_1 &= \varphi_{Z1} \cdot \frac{H_1}{2} + \varphi_{Z2} \cdot \frac{H_1}{2} = \frac{H_1}{2} (\varphi_{Z1} + \varphi_{Z2}) \end{aligned} \quad (16)$$

โดย φ_{Z1} และ φ_{Z2} เป็นอัตราส่วนกำลังสูญเสียของฟันคู่ที่ 1 และคู่ที่ 2 ตามลำดับ อัตราส่วนกำลังสูญเสียนี้สามารถหาได้จากสมการ (13) เช่นกัน สำหรับอัตราส่วนกำลังสูญเสียรวมในขณะที่มีเฟืองขบกัน 2 ฟันสามารถหาได้จากสมการ (17)

$$\varphi_{Total} = \frac{\varphi_{Z1} + \varphi_{Z2}}{2} \quad (17)$$



รูปที่ 5 อัตราส่วนกำลังสูญเสียของแต่ละคู่ฟันตามลำดับการขบที่เวลาต่างๆ และอัตราส่วนกำลังสูญเสียของเฟือง

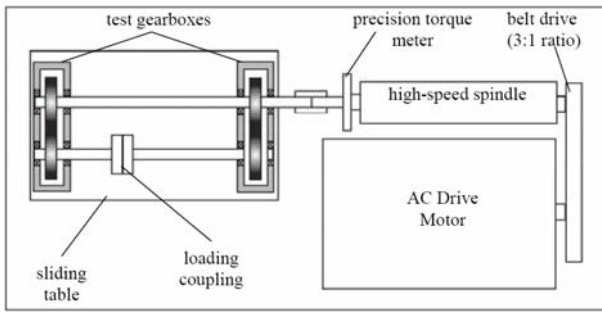
จะพบว่าเมื่อฟันทั้งสองคู่รับกำลังเท่ากัน อัตราส่วนกำลังสูญเสียรวมจะเป็นค่าเฉลี่ยของอัตราส่วนกำลังสูญเสียของแต่ละฟัน อัตราส่วนกำลังสูญเสียของเฟืองในช่วงเวลาต่างๆ แสดงดังรูปที่ 5(ข) ช่วงที่ฟันขบกัน 2 คู่จะเป็นช่วงที่มีกำลังสูญเสียมาก ส่วนที่จุดพิชท์ซึ่งไม่เกิดการไถลของฟันเฟืองจะไม่มีการสูญเสียเลย สำหรับเส้นประในรูปแสดงขนาดของอัตราส่วนกำลังสูญเสียเฉลี่ย $\bar{\varphi}$ ซึ่งหาได้จากสมการ (18)

$$\bar{\varphi} = \frac{1}{Pb} \int_0^{Pb} \varphi \, dn \quad (18)$$

โดย Pb คือระยะเบสพิชท์

4. ผลการประเมินกำลังสูญเสียของเฟืองตรง

เพื่อตรวจสอบว่าแบบจำลองที่สร้างขึ้น สามารถใช้ประเมินอัตราส่วนกำลังสูญเสียได้แม่นยำหรือไม่ ในที่นี้จะทำการเปรียบเทียบผลการประเมินกำลังสูญเสีย กับผลการทดลองซึ่งรายงานโดย T.T.Petry-Johnson และคณะ [2] T.T.Petry-Johnson และคณะ ได้ทดลองวัดกำลังสูญเสียของเฟืองตรงซึ่งมีอัตราทด 1:1 โดยใช้ชุดทดสอบเฟืองแบบ Back-to-back ดังแสดงในรูปที่ 6 ชุดทดสอบแบบนี้ประกอบด้วยห้องเกียร์และเฟืองซึ่งเหมือนกันทุกประการ 2 ชุดต่อเชื่อมกัน ระหว่างเพลลาเพลลาหนึ่ง ซึ่งเชื่อมเฟืองในห้องเกียร์ทั้งสองเข้าด้วยกัน จะติดตั้งคัปปลิงเพื่อเป็นอุปกรณ์ที่ให้ภาระกับระบบ ภาระที่ให้อยู่ในรูปแบบบิดจะถูกส่งให้กับเฟืองทั้งสองคู่ ชุดทดสอบเฟืองนี้จะขับโดยมอเตอร์กระแสสลับ และปรับความเร็วรอบให้เหมาะสมโดยชุดเพิ่มความเร็วและสายพาน เนื่องจากชุดทดสอบนี้เป็นระบบปิดซึ่งกำลังจะเวียนอยู่ภายในระบบเท่านั้น กำลังที่ใช้เพื่อขับเคลื่อนให้เคลื่อนที่จึงมีค่าเท่ากับกำลังสูญเสียที่เกิดขึ้นในระบบทั้งหมด การวัดกำลังสูญเสียจึงทำได้โดยวัดกำลังที่ใช้ขับเคลื่อนเฟือง โดยอุปกรณ์วัดแรงบิดซึ่งอยู่ระหว่างชุดต้น



รูปที่ 6 ชุดทดสอบเฟืองในการทดลองของ T.T.Petry-Johnson และคณะ [2]

ตารางที่ 2 พารามิเตอร์ต่างๆ ของเฟืองที่ใช้ในการทดลอง

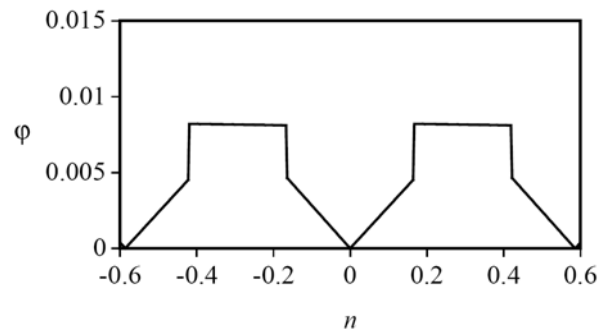
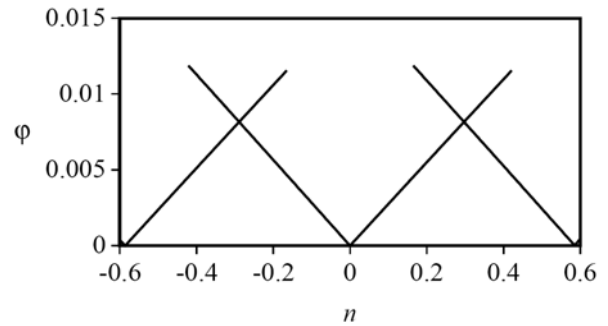
Parameter	23T	40T
Module	3.95	2.32
Pressure angle, deg	25.0	28.0
Face width	19.5	26.7
Center distance	91.5	91.5

กำลังและห้องเกียร์ และวัดความเร็วรอบหมุนของเพลาลูกตวัดอุปกรณ์วัดแรงบิดในขณะนั้น

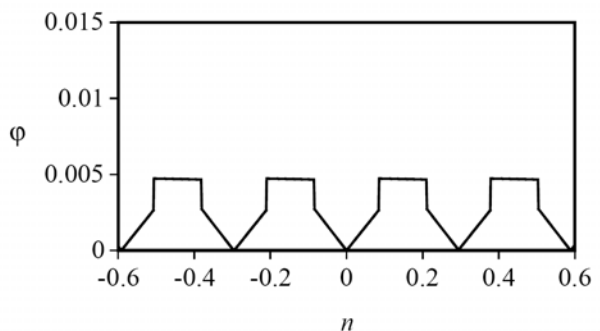
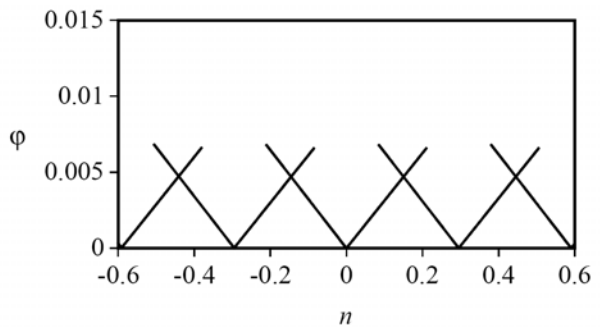
T.T.Petry-Johnson และคณะ ได้ทดลองวัดกำลังสูญเสียที่ความเร็วรอบหมุนและที่ภาระต่างๆ นอกจากนี้ยังได้ศึกษาถึงผลของขนาดฟันเฟือง โดยทำการทดลองเปรียบเทียบกันระหว่างเฟืองตรงซึ่งมีจำนวนฟัน 23 ฟัน โมดูล 3.95 ม.ม. และเฟืองตรงซึ่งมีจำนวนฟัน 40 ฟัน โมดูล 2.32 ม.ม. และเพื่อให้ความเค้นดัดในเฟืองทั้งสองชนิดมีค่าใกล้เคียงกัน ความกว้างของเฟือง 40 ฟันจะมากกว่าเฟือง 23 ฟัน เล็กน้อย อย่างไรก็ตามเนื่องจากความกว้างของฟันแทบจะไม่มีผลต่อกำลังสูญเสียของเฟือง [2] ดังนั้นกำลังสูญเสียที่แตกต่างกันในกรณีของเฟือง 23 ฟัน และ 40 ฟันจึงสามารถพิจารณาว่าเป็นผลจากขนาดของฟันได้ พารามิเตอร์อื่นๆ ของเฟืองที่ใช้ในการทดลองแสดงดังตารางที่ 2

4.1 การประเมินอัตราส่วนกำลังสูญเสีย

ผลการประเมินอัตราส่วนกำลังสูญเสียแสดงในรูปที่ 7 และ 8 การคำนวณในที่นี้จะใช้ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน ($\tan \mu$) เท่ากับ 0.03 ซึ่งเป็นค่าโดยประมาณที่ได้จากการทดลอง ในกรณีที่เฟืองที่ใช้มีการทำผิว และมีการหล่อลื่นอย่างดี จากรูปพบว่าในกรณีของเฟือง 23 ฟันจะมีอัตราส่วนกำลังสูญเสียสูงกว่าเฟือง 40 ฟัน ทั้งนี้เนื่องจากขนาดฟันที่ใหญ่กว่าทำให้เกิดการสูญเสียจากการไถลที่บริเวณห่างจากจุดพิชามากกว่าเมื่อหาอัตราส่วนกำลังสูญเสียเฉลี่ยจะได้ว่า เฟือง 23 ฟันจะมีอัตราส่วนกำลังสูญเสียเฉลี่ย 0.0049 หรือมีประสิทธิภาพการส่งกำลัง 99.51 เปอร์เซ็นต์ ส่วนเฟือง 40 ฟันมีอัตราส่วนกำลังสูญเสีย 0.0028 หรือมีประสิทธิภาพการส่งกำลัง 99.72 เปอร์เซ็นต์



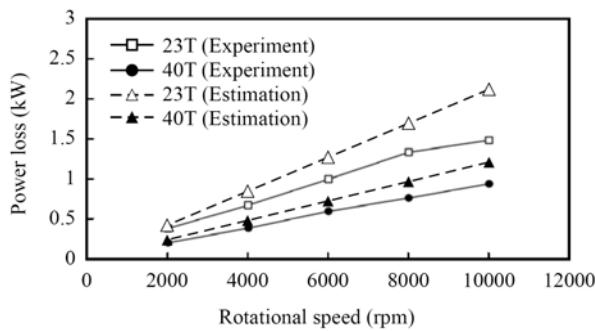
รูปที่ 7 ผลการคำนวณกำลังสูญเสียของเฟือง 23 ฟัน



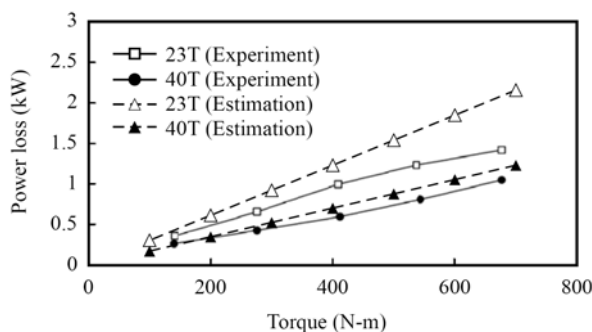
รูปที่ 8 ผลการคำนวณกำลังสูญเสียของเฟือง 40 ฟัน

4.2 การเปรียบเทียบกับผลที่รายงานโดย T.T.Petry-Johnson และคณะ

รูปที่ 9 และ 10 แสดงการเปรียบเทียบผลการวัดกำลังสูญเสียจากการทดลอง และผลการประเมินกำลังสูญเสียจากแบบจำลองที่สร้างขึ้น กำลังสูญเสียที่วัดได้จากการทดลองนั้น จะหักกำลังสูญเสียจากการหมุนซึ่งไม่ขึ้นกับภาระออกไปก่อน และเนื่องจากเฟืองในห้องเกียร์ทั้งสองเหมือนกันทุกประการ กำลังสูญเสียที่เกิดจากเฟืองคู่เดียวจึงเป็นครั้ง-



รูปที่ 9 กำลังสูญเสียที่ความเร็วรอบหมุนต่างๆ



รูปที่ 10 กำลังสูญเสียที่แรงบิดต่างๆ

หนึ่งของกำลังสูญเสียที่วัดได้ และหักกำลังสูญเสียจากการหมุนไปแล้ว ดังนั้นกำลังสูญเสียที่แสดงในรูปที่ 9 และ 10 จึงเหลือเพียงกำลังสูญเสียจากการไถลและการกลิ้งของเฟืองเพียงคู่เดียว ซึ่งสามารถเปรียบเทียบกับผลที่ประเมินจากแบบจำลองได้

รูปที่ 9 แสดงกำลังสูญเสียที่ความเร็วรอบหมุนเฟืองต่างๆ โดยในการทดลองจะคงแรงบิดคงที่ 413 Nm ผลที่ได้จากการประเมินมีแนวโน้มเหมือนกับผลการทดลอง โดยกำลังสูญเสียจะมีค่าเพิ่มขึ้นแบบเชิงเส้นเมื่อเพิ่มความเร็วรอบหมุนขึ้น และเฟือง 23 ฟัน ซึ่งมีขนาดฟันใหญ่กว่าจะมีกำลังสูญเสียมากกว่าเฟือง 40 ฟัน รูปที่ 10 แสดงกำลังสูญเสียที่แรงบิดต่างๆ โดยจะทดลองที่ความเร็วรอบหมุนคงที่ 6000 rpm ผลการประเมินมีความสอดคล้องกับผลการทดลอง โดยกำลังสูญเสียจะเพิ่มขึ้นแบบเชิงเส้นเมื่อเพิ่มแรงบิด และเฟือง 23 ฟันจะมีกำลังสูญเสียมากกว่าเฟือง 40 ฟัน

ถึงแม้ว่าผลการประเมิน จะมีแนวโน้มสอดคล้องกับผลการทดลอง ค่ากำลังสูญเสียที่ประเมินได้ ยังมีความแตกต่างกับค่าจากการทดลองพอสมควร ปัจจัยที่มีผลมากต่อความแม่นยำของการประเมินตามแบบจำลองนี้คือการเลือกใช้ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน โดยในที่นี้เลือกใช้

ค่าจากงานวิจัยที่มีมาก่อน อย่างไรก็ตามค่าที่รายงานจากงานวิจัยต่างๆ มีค่าแปรผันค่อนข้างมาก ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน 0.03 ที่เลือกเป็นค่ากลางๆ ที่สอดคล้องกับช่วงสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานที่รายงานในงานวิจัยหลายๆ ชิ้น ซึ่งอาจจะไม่สอดคล้องกับเฟืองที่ใช้ในการทดลองของ T.T.Petry-Johnson และคณะ ปัจจัยอื่นๆ ที่อาจส่งผลกระทบต่อความแม่นยำของแบบจำลองคือ การประมาณการรับภาระของฟัน โดยในที่นี้ได้ประมาณให้ฟันทั้งสองรับภาระเท่ากัน ในขณะที่ฟันขบกันสองฟัน ซึ่งการสมมุติเช่นนี้อาจจะคลาดเคลื่อนจากความเป็นจริงได้ อย่างไรก็ตามหากการกระจายของภาระที่แต่ละฟันรับ ในแต่ละช่วงเวลายาวนานกว่านี้ จะสามารถปรับปรุงแบบจำลองให้มีความแม่นยำมากขึ้นได้

5. สรุป

บทความนี้นำเสนอถึงแบบจำลองอย่างง่าย เพื่อประเมินกำลังสูญเสียในการส่งกำลังด้วยเฟืองตรง โดยคำนึงถึงกำลังสูญเสียที่เป็นผลมาจากแรงเสียดทานจากการไถลของฟันเฟืองเป็นหลัก ผลการประเมินเมื่อเทียบกับผลการทดลอง ซึ่งรายงานโดยผู้วิจัยอื่นพบว่า มีแนวโน้มสอดคล้องกัน โดยกำลังสูญเสียมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นแบบเชิงเส้นเมื่อความเร็วรอบหมุนและแรงบิดมีค่าเพิ่มขึ้น และกำลังสูญเสียของเฟืองที่มีฟันใหญ่หรือมีโมดูลใหญ่จะมากกว่าเฟืองที่มีฟันเล็กหรือมีโมดูลน้อย จากผลการเปรียบเทียบนี้แสดงให้เห็นว่า แบบจำลองนี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้เพื่อประเมินหาแนวโน้มกำลังสูญเสียที่เกิดขึ้นได้ ซึ่งจะเป็นประโยชน์ต่อการออกแบบเฟืองและระบบเฟือง

6. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้การสนับสนุนเงินอุดหนุนการวิจัยนี้

เอกสารอ้างอิง

1. Y. Michlin and V. Myunster, 2002. Determination of Power Losses in Gear Transmissions With Rolling and Sliding Friction Incorporated, Mechanism and Machine Theory, 37, pp. 167-174.
2. T.T. Petry-Johnson, A. Kahraman, N.E. Anderson and D.R. Chase, Experimental Investigation of Spur Gear Efficiency, Proceedings of the ASME 2007 International Design Engineering Technical Conferences & Computers and Information in Engineering Conference, Las Vegas, USA, September 4-7, 2007.