

การศึกษาปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อกำลังสูญเสียจากการไถลในการส่งกำลังด้วยเฟืองตรงและเฟืองเฉียง: การประเมินกำลังสูญเสียจากแบบจำลองและผลการทดลอง

The Study on Parameters Affecting to Sliding Loss in Spur Gear and Helical Gear: Estimation of Power Loss by Using Gear Meshing Model and Experimental Results

เจษฎา แพร่นันธะ¹, ชาคกริต เย็นที¹, ภูวดล อัครพิชญโชติ¹, สุรินทร์ พงศ์ศุภสมิทธิ¹ และ ชนัตต์ รัตนสุมาวงศ์^{1*}

¹ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ถนนพญาไท เขตปทุมวัน กรุงเทพฯ 10330

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

บทคัดย่อ

เฟืองเป็นชิ้นส่วนสำคัญในระบบส่งกำลังที่มีการใช้อย่างกว้างขวางในงานประเภทต่างๆ ถึงแม้ว่าคู่เฟืองแต่ละคู่จะมีประสิทธิภาพในการส่งกำลังสูง แต่ปกติมักจะใช้เฟืองหลายๆ คู่ ในการขับเคลื่อนส่งกำลังทำให้กำลังสูญเสียเพิ่มอย่างมีนัยสำคัญ ด้วยเหตุนี้การศึกษาผลของปัจจัยรูปร่างต่างๆ ที่มีต่อกำลังสูญเสียเนื่องจากการไถลของคู่เฟืองตรงและเฟืองเฉียงจึงมีความสำคัญอย่างมาก และสามารถใช้เป็นข้อมูลพื้นฐานในการออกแบบหรือเลือกใช้เฟืองเพื่อลดกำลังสูญเสียในระบบเฟืองส่งกำลัง ปัจจัยรูปร่างที่ศึกษาในที่นี้ ได้แก่ โมดูล มุมกด มุมฮิลิกซ์ อัตราทด และความกว้างหน้าฟัน วิธีการศึกษาทำการประเมินกำลังสูญเสียจากการไถลของเฟืองที่มีปัจจัยรูปร่างต่างๆ ด้วยแบบจำลองการขับเคลื่อนของเฟือง และทำการทดลองโดยใช้ชุดทดสอบเฟืองแบบ back-to-back ผลการทดลองพบว่าคู่เฟืองที่มีโมดูล อัตราทด และความกว้างหน้าฟันมากจะมีกำลังสูญเสียมาก แต่คู่เฟืองที่มีมุมกดและมุมฮิลิกซ์มากจะมีกำลังสูญเสียน้อย เมื่อเปรียบเทียบผลการทดลองกับผลการประเมินจากแบบจำลองพบว่าผลของโมดูล มุมกด และอัตราทามีแนวโน้มสอดคล้องกัน แต่ผลของมุมฮิลิกซ์และความกว้างหน้าฟันมีแนวโน้มไม่สอดคล้องกัน

คำหลัก: กำลังสูญเสียจากการไถล แบบจำลอง เฟืองตรง เฟืองเฉียง ชุดทดสอบเฟืองแบบ back-to-back

Abstract

Gear is an important machine element in the transmission system that has been used extensively in various works. Although the efficiency of a gear pair is high, multi-stages gear transmission is frequently used that makes the total power loss increase significantly. With this reason, the study on the parameters that affect to the sliding loss of spur and helical gear pair is very important and can be used as the basic data for the gear design or gear selection for reducing power losses in the gear system. The parameters focused here are module, pressure angle, helix angle, gear ratio and face width. The study was done by using gear meshing model to estimate the effects of gear parameters, and also experiment by back-to-back gear test rig. The experimental results show that the gear pairs having larger module, larger gear ratio and wider face width have higher power loss, but the gear pairs having larger pressure angle and larger helix angle have lower power loss. By comparing the experimental results to the estimated results, it is found that for the effects of module, pressure angle and gear ratio the experimental results agree well with estimation results, but the results do not agree for the effect of helix angle and face width.

Keywords: Sliding Loss, Model, Spur Gear, Helical Gear, Back-to-Back Gear Test Rig.

1. บทนำ

ปัญหาวิกฤตพลังงาน และราคาน้ำมันเชื้อเพลิงที่สูงขึ้นมากในปัจจุบัน ทำให้การศึกษาเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของเครื่องจักรกลมีความจำเป็นมากยิ่งขึ้น เพื่อเป็นชิ้นส่วนกลหนึ่งในระบบส่งกำลังที่มีการใช้อย่างกว้างขวางในงานต่างๆ เช่น ในระบบส่งกำลังของรถยนต์ หรือเครื่องจักรกลการเกษตร และในเครื่องจักรกลอุตสาหกรรม ถึงแม้ว่าเฟืองแต่ละคู่จะมีประสิทธิภาพในการส่งกำลังสูง แต่การใช้งานเฟืองมักจะใช้เฟืองพร้อมๆ กันหลายๆ ชิ้น จึงทำให้กำลังสูญเสียในระบบเฟืองเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ การลดกำลังสูญเสียในคู่เฟืองส่งกำลังจึงเป็นพื้นฐานสำคัญอย่างหนึ่งในการเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานของเครื่องจักรเพื่อลดการใช้เชื้อเพลิงลง นอกจากนี้เนื่องจากกำลังสูญเสียในระบบเฟืองจะถูกเปลี่ยนรูปไปเป็นพลังงานความร้อน การลดกำลังสูญเสียในระบบเฟืองจึงช่วยลดความร้อนขณะทำงาน ช่วยยืดอายุการใช้งานของเฟืองส่งกำลัง และช่วยลดปริมาณการหล่อลื่นที่จำเป็นต้องใช้ให้น้อยลงได้

ด้วยความสำคัญดังกล่าวข้างต้น จึงมีงานวิจัยจำนวนมากที่ศึกษาถึงกำลังสูญเสีย และประสิทธิภาพในการส่งกำลังของเฟือง การศึกษาเหล่านี้สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 กลุ่มใหญ่ๆ ได้แก่ การศึกษาโดยการทดลองวัดกำลังสูญเสียในคู่เฟืองและการศึกษากลไกการเกิดกำลังสูญเสียโดยการสร้างแบบจำลองคณิตศาสตร์เพื่อประเมินกำลังสูญเสีย ตัวอย่างการศึกษาในกลุ่มการทดลองในกรณีของเฟืองตรง ได้แก่ การศึกษาของ Petry-Johnson et al. [1] และ Haizuka et al. [2] ส่วนในกรณีของเฟืองเฉียง ได้แก่ การศึกษาของ Vaidyanathan [3] และ Haizuka et al. [4] การศึกษาในกลุ่มการทดลองเหล่านี้จะศึกษาผลของปัจจัยรูปร่างต่างๆ และผลของน้ำมันหล่อลื่นที่มีต่อกำลังสูญเสียในคู่เฟือง โดยที่ไม่ได้กล่าวถึงกลไกการเกิดกำลังสูญเสียของคู่เฟือง ผลการศึกษาเหล่านี้จึงยังไม่สามารถนำมาใช้ทำนายหรือประเมินกำลังสูญเสียได้

ด้วยเหตุนี้จึงมีงานวิจัยหลายๆ ชิ้น มุ่งศึกษาถึงกลไกการเกิดกำลังสูญเสีย และสร้างแบบจำลองเพื่อประเมินกำลังสูญเสียในคู่เฟือง ตัวอย่างงานวิจัยเหล่านี้ ได้แก่ งานวิจัยของ Michlin and Myunster [5], Anderson and Lowenthal [6], Terauchi et al. [7], Heingartner and Mba [8] และงานวิจัยก่อนหน้าของผู้วิจัย [9] งานวิจัยในกลุ่มนี้จะสร้างแบบจำลองเพื่อประเมินกำลังสูญเสียโดยใช้ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานเป็นค่าคงที่หรือใช้ค่าจากสูตรสำเร็จ (Empirical formulas) ซึ่งได้

จากการทดลอง เช่นดังที่เสนอในเอกสารอ้างอิง [10-14] การใช้ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานจากสูตรสำเร็จนี้ทำให้สามารถคำนวณกำลังสูญเสียได้ง่าย แต่ก็มีข้อจำกัดซึ่งขึ้นกับสภาวะการทดลองที่ใช้ในการสร้างสูตรสำเร็จนั้นๆ เพื่อหลีกเลี่ยงถึงข้อจำกัดนี้ จึงมีงานวิจัยบางชิ้น เช่น งานวิจัยของ Xu [15] และงานของ Diab and Velez [16] ที่ใช้หลักการของ EHL (Elastohydrodynamics Lubricants) ในการคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานแทน ถึงแม้ว่าวิธี EHL จะสามารถคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานได้แม่นยำก็ตาม แต่ก็จำเป็นต้องใช้เวลาในการคำนวณมาก จึงยังไม่เหมาะสมจะใช้ในการออกแบบเฟืองในทางปฏิบัติ

สำหรับในการศึกษานี้จะศึกษาผลของปัจจัยรูปร่างต่างๆ ได้แก่ ผลของโมดูล มุมกด มุมอีลิคซ์ อัตราทด และความกว้างหน้าฟัน ต่อกำลังสูญเสียจากการไถลของคู่เฟือง เนื่องจากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าสำหรับเฟืองขนาดเล็กซึ่งใช้การหล่อลื่นแบบฉีดและทำงานที่ความเร็วรอบไม่สูงมากนัก กำลังสูญเสียจากการไถลจะมีค่ามากกว่ากำลังสูญเสียชนิดอื่นๆ ในห้องส่งกำลังมาก ในที่นี้จะทำการศึกษาทั้งโดยการทดลองด้วยชุดทดสอบเฟือง และการประเมินจากแบบจำลองที่ผู้วิจัยได้เคยเสนอไว้ [9] ผลการศึกษาจะทำให้ทราบถึงกลไกการเกิดกำลังสูญเสียและอิทธิพลของปัจจัยต่างๆ ที่มีต่อกำลังสูญเสีย ซึ่งสามารถนำไปใช้อ้างอิงในการออกแบบ หรือเลือกใช้เฟืองตรงและเฟืองเฉียงได้

2. ประเภทของกำลังสูญเสีย

กำลังสูญเสียที่เกิดขึ้นในชุดทดสอบเฟืองแบบ back-to-back เกิดจากอุปกรณ์หลัก 2 ชนิด ได้แก่ กำลังสูญเสียที่เกิดขึ้นจากเฟืองส่งกำลัง และกำลังสูญเสียที่เกิดขึ้นจากตลับลูกปืน สำหรับกำลังสูญเสียจากการส่งกำลังของเฟืองสามารถแบ่งได้เป็น 2 ประเภท ประเภทแรกคือกำลังสูญเสียที่ขึ้นกับขนาดของภาระแรงบิด ได้แก่ กำลังสูญเสียจากการขบส่งกำลังของฟันเฟือง (P_{mesh}) ซึ่งเป็นผลรวมจากกำลังสูญเสียจากแรงเสียดทานจากการไถล (sliding loss, $P_{sliding}$) และกำลังสูญเสียจากการกลิ้งของฟันเฟืองระหว่างการขบ (rolling loss, $P_{rolling}$) กำลังสูญเสียประเภทที่สองคือกำลังสูญเสียที่ไม่ขึ้นกับขนาดของภาระแรงบิด ได้แก่ กำลังสูญเสียจากการหมุนด้านอากาศ (windage loss, P_w) และกำลังสูญเสียจากการหมุนปั่นน้ำมันหล่อลื่น (churning loss) ซึ่งเกิดใน

ระบบที่เฟืองแช่น้ำมันหล่อลื่น และหมุนสาดน้ำมันหล่อลื่นเพื่อหล่อลื่นภายในห้องเฟือง อย่างไรก็ตามในที่นี้ใช้การหล่อลื่นแบบฉีด (Jet lubrication) ทำให้ไม่มีกำลังสูญเสียจากการหมุนปั่นน้ำมันหล่อลื่น กำลังสูญเสียที่ไม่ขึ้นกับขนาดของภาระแรงบิดที่เกิดจากเฟืองส่งกำลังในการศึกษานี้จึงเกิดจากการหมุนต้านอากาศเพียงอย่างเดียว

กำลังสูญเสียจากตลับลูกปืนนั้นสามารถแบ่งได้เป็น 2 ประเภทเช่นเดียวกันกับเฟืองคือกำลังสูญเสียที่ขึ้นกับขนาดของภาระแรงบิด ($P_{b,load dep.}$) และกำลังสูญเสียที่ไม่ขึ้นกับขนาดของภาระแรงบิด ($P_{b,load indep.}$)

กำลังสูญเสียที่ขึ้นกับภาระแรงบิดทั้งจากเฟืองและตลับลูกปืนรวมกันเรียกว่ากำลังสูญเสียทางกล (P_{mech}) ส่วนกำลังสูญเสียที่ไม่ขึ้นกับภาระแรงบิดทั้งจากเฟืองและตลับลูกปืนรวมกันเรียกว่ากำลังสูญเสียจากการหมุนต้านแรงเสียดทาน (P_{spin})

3. วิธีการศึกษา

การศึกษาแบ่งเป็น 2 ส่วน ได้แก่ การศึกษาโดยใช้แบบจำลองเพื่อประเมินกำลังสูญเสียและการศึกษาโดยการทดลอง การประเมินผลจากแบบจำลองใช้แบบจำลองการขบกันของฟันเฟืองที่ผู้วิจัยได้เคยนำเสนอไว้ก่อนหน้านี้ [9] และใช้สมการซึ่งเสนอโดย Misharin [10] สำหรับประมาณค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของฟันเฟืองระหว่างการขบ ส่วนการทดลองจะทำการทดลองทั้งแบบไม่มีภาระแรงบิดและมีภาระแรงบิด การศึกษานี้จะศึกษาผลของปัจจัยรูปร่าง (parameter) ต่างๆ ได้แก่ ผลของโมดูล (module) มุมกด (pressure angle) มุมฮิลิกซ์ (helix Angle) อัตราทด (gear ratio) และความกว้างหน้าฟัน (face width) โดยรายละเอียดการทดลองจะอธิบายในหัวข้อถัดไป

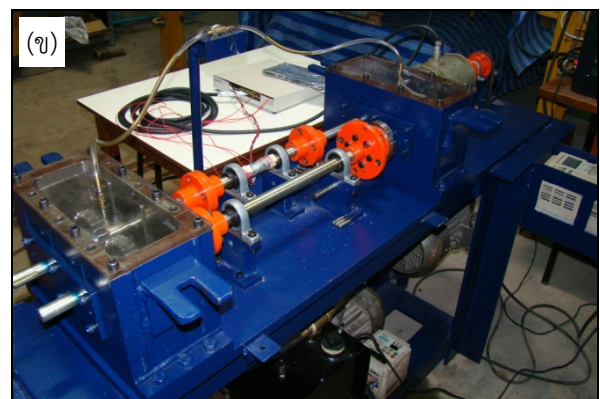
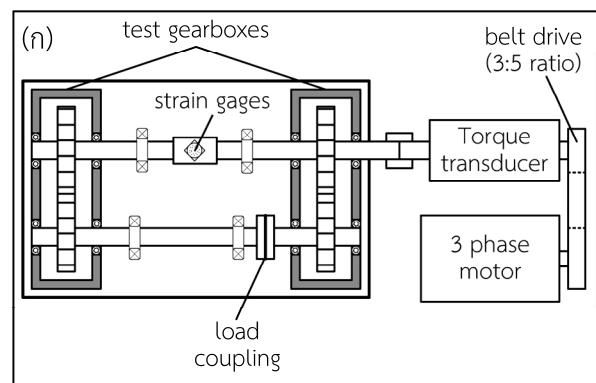
4. การวัดกำลังสูญเสียของเฟือง

4.1 ชุดทดลองและการทดลองวัดกำลังสูญเสีย

ชุดทดลองที่ใช้ในการวัดกำลังสูญเสียเป็นชุดทดสอบเฟืองแบบ back-to-back ซึ่งออกแบบและสร้างโดยคณะผู้วิจัย [17] รูปที่ 1(ก) แสดงแผนผังชุดทดสอบเฟือง และรูปที่ 1(ข) แสดงภาพถ่ายชุดทดสอบเฟือง ชุดทดสอบนี้เป็นชุดทดสอบเฟืองแบบไม่มีกำลังขาออก กำลังที่ใส่เข้าไปจะไหลวนอยู่ในระบบเพื่อชดเชยแรงเสียดทานและกำลังสูญเสียต่างๆ ดังนั้นกำลังขาเข้าที่วัดได้ในชุดทดสอบ

เฟืองแบบ back-to-back จึงมีค่าเท่ากับกำลังสูญเสียรวมในระบบ

ชุดทดสอบเฟืองประกอบด้วยห้องเฟือง (gearbox) และเฟืองภายในที่เหมือนกันทุกประการ 2 ชุด ห้องเฟืองแต่ละห้องจะมีเฟืองขบกันอยู่ 1 คู่ และเฟืองแต่ละตัวมีตลับลูกปืนรองรับทั้งหมด 2 ตัว ห้องเฟืองทั้ง 2 ห้องจะเชื่อมต่อกันด้วยเพลาคอนกรีตที่ขนานกัน ใช้มอเตอร์ไฟฟ้า 3 เฟส ขับชุดทดสอบเฟือง และหดรอบด้วยสายพานในอัตราทด 3:5 เพื่อเพิ่มความเร็วยรอบของเพลาก่อนเข้าห้องเฟืองเพื่อให้ได้ความเร็วยรอบในช่วง 500-2,500 รอบต่อนาที ซึ่งใกล้เคียงกับสภาวะความเร็วยรอบทำงานของเฟืองที่ใช้ในรถยนต์ ขณะทดลองใช้การหล่อลื่นแบบฉีด โดยฉีคน้ำมันหล่อลื่นไปที่ตำแหน่งการขบของฟันเฟือง อุณหภูมิของน้ำมันหล่อลื่นถูกควบคุมไว้ที่ 60-70 องศาเซลเซียส เพื่อควบคุมให้ความหนืดของน้ำมันหล่อลื่นมีค่าคงที่



รูปที่ 1 ชุดทดสอบเฟืองแบบ back-to-back

การให้ภาระแรงบิดในระบบทำโดยติดตั้งคัปปลิงสำหรับให้ภาระแรงบิด (load coupling) ไว้ที่ด้านหนึ่งของเพลาดังแสดงในรูปที่ 1(ก) และใช้การถ่วงน้ำหนักด้วยแขนให้แรงบิดเพื่อให้เพลายึดกันตำแหน่งที่บิดและเกิดแรงกดอัดที่หน้าฟันเฟือง แรงบิดภายในระบบ (T_c) นี้วัดได้โดยใช้สเตรนเกจ (strain gages) ซึ่งติดไว้บน

เพลาลำเชื่อมต่อระหว่างห้องเฟืองทั้ง 2 ห้อง แรงบิดขาเข้าของระบบ (T_T) วัดโดยใช้อุปกรณ์วัดแรงบิด (torque transducer) ส่วนความเร็วรอบเพลากำลึงเข้า (N_{input}) วัดโดยใช้เครื่องวัดความเร็วรอบแบบสัมผัส (tachometer) ค่าที่วัดได้จะนำมาคำนวณหาค่าลึงสูญเสียที่เกิดขึ้นในระบบต่อไป

การทดลองทำที่ความเร็วรอบหมุนของเพลาลำ 5 ค่า ได้แก่ 500 1,000 1,500 2,000 และ 2,500 รอบต่อนาที และทดลองภายใต้สภาวะการทำงานทั้งแบบไม่มีภาระแรงบิดและมีภาระแรงบิด โดยแบ่งภาระแรงบิดออกเป็น 6 ช่วง ได้แก่ 0-10 (ไม่มีภาระแรงบิด), 11-50, 51-100, 101-150, 151-200 และ 201-250 นิวตันเมตร สาเหตุในการให้ภาระแรงบิดภายในระบบเป็นช่วง เนื่องจากข้อจำกัดของอุปกรณ์ให้ภาระแรงบิด และค่าแบ็คแลช (backlash) ของเฟืองแต่ละคู่ที่แตกต่างกัน ส่งผลให้ไม่สามารถควบคุมภาระแรงบิดในแต่ละกรณีให้เท่ากันพอดีได้ ลำดับการทดลองทำจากภาระแรงบิดน้อยไปภาระแรงบิดมาก และความเร็วรอบหมุนต่ำไปสูง

4.2 ชุดเฟืองที่ใช้ในการทดลอง

ชุดเฟืองที่ใช้ในการทดลองมีทั้งหมด 8 ชุด โดยแบ่งออกเป็นเฟืองตรง 4 ชุด แสดงรายละเอียดในตารางที่ 1 และเฟืองเฉียง 4 ชุด แสดงรายละเอียดในตารางที่ 2 สำหรับเฟืองตรงจะใช้เฟืองตรงชุด A เป็นชุดอ้างอิง ส่วนเฟืองตรงชุด B, C และ D จะปรับค่าโมดูล มุมกด และอัตราทด โดยคงปัจจัยรูปร่างอื่นๆ ไว้ เพื่อศึกษาผลของโมดูล มุมกด และอัตราทด ตามลำดับ

ตารางที่ 1 ปัจจัยรูปร่างของเฟืองตรงที่ใช้ในการทดลอง

Parameters	Gear set			
	A	B	C	D
Number of teeth	30	45	30	20,40
Module (mm)	3	2	3	3
Pressure angle (deg)	20	20	14.5	20
Face width (mm)	20	20	20	20
Pitch diameter (mm)	90	90	90	60,120
Gear ratio	1:1	1:1	1:1	1:2

ในกรณีของเฟืองเฉียงจะใช้เฟืองเฉียงชุด E เป็นชุดอ้างอิง ส่วนเฟืองเฉียงชุด F, G และ H จะปรับค่าโมดูล มุมกด

และความกว้างหน้าฟัน โดยคงปัจจัยรูปร่างอื่นๆ ไว้ เพื่อศึกษาผลของโมดูล มุมกด และความกว้างหน้าฟันตามลำดับ สำหรับผลของมุมอีลิคซ์ศึกษาโดยเปรียบเทียบผลของเฟืองตรงชุด A ซึ่งมีมุมอีลิคซ์ 0 องศา กับเฟืองเฉียงชุด E ที่มีมุมอีลิคซ์ 33.5 องศา โดยปัจจัยรูปร่างอื่นๆ เหมือนกัน

ตารางที่ 2 ปัจจัยรูปร่างของเฟืองเฉียงที่ใช้ในการทดลอง

Parameters	Gear set			
	E	F	G	H
Number of teeth	30	15	30	30
Module (mm)	3	6	3	3
Pressure angle (deg)	20	20	14.5	20
Helix Angle (deg)	33.5	33.5	33.5	33.5
Face width (mm)	20	20	20	40
Pitch diameter (mm)	90	90	90	90
Gear ratio	1:1	1:1	1:1	1:1

5. การคำนวณค่าลึงสูญเสียจากการไถลจากการทดลอง

ค่าลึงสูญเสียรวมในระบบ (P_{total}) ของชุดทดสอบเฟืองแบบ back-to-back เป็นผลมาจากค่าลึงสูญเสียที่ขึ้นกับภาระแรงบิดหรือค่าลึงสูญเสียทางกล และค่าลึงสูญเสียที่ไม่ขึ้นกับภาระแรงบิด ได้แก่ ค่าลึงสูญเสียจากการหมุนต้านแรงเสียดทาน ดังสมการ

$$P_{total} = P_{mech} + P_{spin} \quad (1)$$

สำหรับชุดทดสอบเฟืองแบบ back-to-back ค่าลึงสูญเสียรวมจะมีค่าเท่ากับค่าลึงขาเข้าระบบ และเขียนได้ดังสมการ

$$P_{total} = P_{input} = T_T \times \omega_{input} \quad (2)$$

เมื่อ ω_{input} คือความเร็วเชิงมุมขาเข้าระบบ สามารถหาได้จากสมการ

$$\omega_{input} = \frac{2\pi N_{input}}{60} \quad (3)$$

การทดลองนี้แบ่งออกเป็น 2 ส่วน ได้แก่ การทดลองวัดค่าลึงสูญเสียขณะไม่มีภาระแรงบิดและวัดค่าลึงสูญเสียขณะมีภาระแรงบิด การทดลองทั้งสองส่วนทำให้สามารถหาค่าลึงสูญเสียจากการหมุนต้านแรงเสียดทานและค่าลึงสูญเสียจากการไถลได้ดังต่อไปนี้

5.1 การทดลองขณะไม่มีภาระแรงบิด

การทดลองนี้เนื่องจากไม่มีภาระแรงบิด กำลังสูญเสียที่ขึ้นกับภาระแรงบิดจะมีค่าเป็นศูนย์ ดังนั้นจากสมการ (1) และ (2) จะได้

$$P_{input} = P_{total} \Big|_{T_c=0} = 0 + P_{spin}$$

$$P_{input} = P_{total} \Big|_{T_c=0} = P_{spin} \quad (4)$$

จะเห็นว่ากำลังสูญเสียรวมมีผลมาจากกำลังสูญเสียจากการหมุนต้านแรงเสียดทานเพียงอย่างเดียว ดังนั้นการทดลองในสถานะที่ไม่มีภาระแรงบิดจึงทำให้ทราบถึงกำลังสูญเสียจากการหมุนต้านอากาศได้

5.2 การทดลองขณะมีภาระแรงบิด

กำลังสูญเสียที่วัดได้ในกรณีนี้จะเป็นผลรวมของกำลังสูญเสียที่ขึ้นกับภาระแรงบิด และกำลังสูญเสียจากการหมุนต้านแรงเสียดทาน ดังที่ได้แสดงไว้ในสมการที่ (1) เนื่องจากกำลังสูญเสียที่ขึ้นกับภาระแรงบิดนั้นเป็นผลมาจากกำลังสูญเสียจากการขบส่งกำลังของฟันเฟือง และกำลังสูญเสียจากตลับลูกปืน ดังนั้นกำลังสูญเสียรวมและกำลังสูญเสียที่ขึ้นกับภาระแรงบิดในสมการที่ (1) สามารถเขียนได้เป็น

$$P_{total} = P_{mesh} + P_{b,load dep.} + P_{spin} \quad (5)$$

และ

$$P_{mech} = P_{mesh} + P_{b,load dep.} \quad (6)$$

โดย P_{spin} หาได้จากการทดลองขณะไม่มีภาระแรงบิด ส่วน P_{mesh} และ $P_{b,load dep.}$ ทั้งสองชนิดนี้สามารถหาได้จากสมการ

$$P_{mesh} = P_{sliding} + P_{rolling} \quad (7)$$

และ

$$P_{b,load dep.} = \frac{M_b \omega_b}{1000} \quad (8)$$

เมื่อ M_b คือค่าโมเมนต์แรงเสียดทานจากการกลิ้งของตลับลูกปืน และ ω_b คือความเร็วเชิงมุมของตลับลูกปืน

ชุดทดสอบเฟืองดังที่แสดงในรูปที่ 1(ก) ประกอบด้วยเฟือง 2 คู่ ตลับลูกปืนของห้องเฟือง 8 ตัว และตลับลูกปืนที่ใช้ในการรองรับเพลลาที่เชื่อมต่อระหว่างห้องเฟือง 4 ตัว ดังนั้นกำลังสูญเสียที่ขึ้นกับภาระแรงบิดในสมการที่ (6) สามารถเขียนใหม่เพื่อแสดงกำลังสูญเสียจากส่วนประกอบต่างๆ ได้ดังสมการ

$$P_{mech} = 2P_{mesh} + [8P_{b,load dep.}]_{gearbox} + [4P_{b,load dep.}]_{bearing housing} \quad (9)$$

เนื่องจากตลับลูกปืนที่ใช้ในการรองรับเพลลาที่เชื่อมต่อระหว่างห้องเฟืองนั้น รองรับภาระที่เกิดจากน้ำหนักของเพลลาซึ่งมีค่าน้อยมาก เมื่อเทียบกับภาระของตลับลูกปืนที่อยู่ภายในเบ้าใส่ตลับลูกปืนในห้องเฟืองที่ต้องรองรับน้ำหนักของเฟืองและภาระแรงกดที่หน้าฟันเฟืองในสถานะที่มีภาระแรงบิดในระบบ จากเหตุผลข้างต้นทำให้สามารถละทิ้งกำลังสูญเสียจากตลับลูกปืนที่ใช้ในการรองรับเพลลาที่เชื่อมต่อระหว่างห้องเฟืองทั้ง 4 ตัว ไปได้ ดังนั้นสมการ (9) จะสามารถลดรูปได้เป็นดังสมการ

$$P_{mech} = 2[P_{sliding} + P_{rolling}] + [8P_{b,load dep.}]_{gearbox} \quad (10)$$

และเนื่องจากกำลังสูญเสียจากการกลิ้งของฟันเฟืองระหว่างการขบมีขนาดน้อยกว่ากำลังสูญเสียจากการไถลมาก กำลังสูญเสียเนื่องจากการกลิ้งจึงสามารถละทิ้งไปได้ [5] ดังนั้นกำลังสูญเสียจากการไถลจึงสามารถคำนวณได้จาก

$$P_{sliding} = \frac{1}{2} P_{mech} - [4P_{b,load dep.}]_{gearbox} \quad (11)$$

หรือ

$$P_{sliding} = \frac{1}{2} (P_{total} - P_{spin}) - [4P_{b,load dep.}]_{gearbox} \quad (12)$$

โดย P_{total} และ P_{spin} สามารถวัดได้จากการทดลองในขณะมีภาระแรงบิดและไม่มีภาระแรงบิด ตามลำดับ ส่วน $P_{b,load dep.}$ สามารถหาได้จากการคำนวณ ดังนั้นกำลังสูญเสียจากการไถลจึงสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (12) กำลังสูญเสียจากการไถลนี้สามารถนำไปเปรียบเทียบกับกำลังสูญเสียที่ประเมินจากแบบจำลองได้

6. ผลการประเมินและผลการทดลอง

6.1 ผลการประเมินและผลการทดลองของเฟืองตรง

ผลการประเมินและผลการทดลองวัดกำลังสูญเสียจากการไถลของเฟืองตรง แสดงดังรูปที่ 2 โดยรูปภาพด้านซ้ายคือกำลังสูญเสียที่ได้จากการทดลอง และรูปภาพทางด้านขวาคือกำลังสูญเสียที่ได้จากแบบจำลอง จากรูปพบว่ากำลังสูญเสียจากการไถลที่ได้จากแบบจำลองและการทดลองมีแนวโน้มสอดคล้องกัน โดยเมื่อความเร็วรอบและภาระแรงบิดเพิ่มมากขึ้นจะทำให้กำลังสูญเสียมีค่ามากขึ้นไปด้วย โดยมีลักษณะการเพิ่มขึ้นเป็นแบบเชิงเส้นสำหรับผลของปัจจัยต่างๆ เมื่อเปรียบเทียบระหว่างเฟืองตรงชุด A และชุด B ที่ปัจจัยรูปร่างเหมือนกันแต่มีโมดูลต่างกัน พบว่าเฟืองตรงชุด A ซึ่งมีโมดูลมากกว่าจะมีกำลัง

สูญเสียมากกว่า เมื่อพิจารณาเฟืองตรงชุด A และชุด C ซึ่งมีมุมกดต่างกัน พบว่าเฟืองตรงชุด A ซึ่งมีมุมกดมากกว่าจะมีกำลังสูญเสียน้อยกว่า และสุดท้ายเมื่อเปรียบเทียบระหว่างเฟืองตรงชุด A และชุด D ที่มีอัตราทดต่างกัน พบว่าที่แรงบิดเพลากำลังเข้าเท่ากัน เฟืองตรงชุด A ที่มีอัตราทด 1:1 มีกำลังสูญเสียน้อยกว่าเฟืองตรงชุด D ที่มีอัตราทด 1:2

6.2 ผลการประเมินและผลการทดลองของเฟืองเฉียง

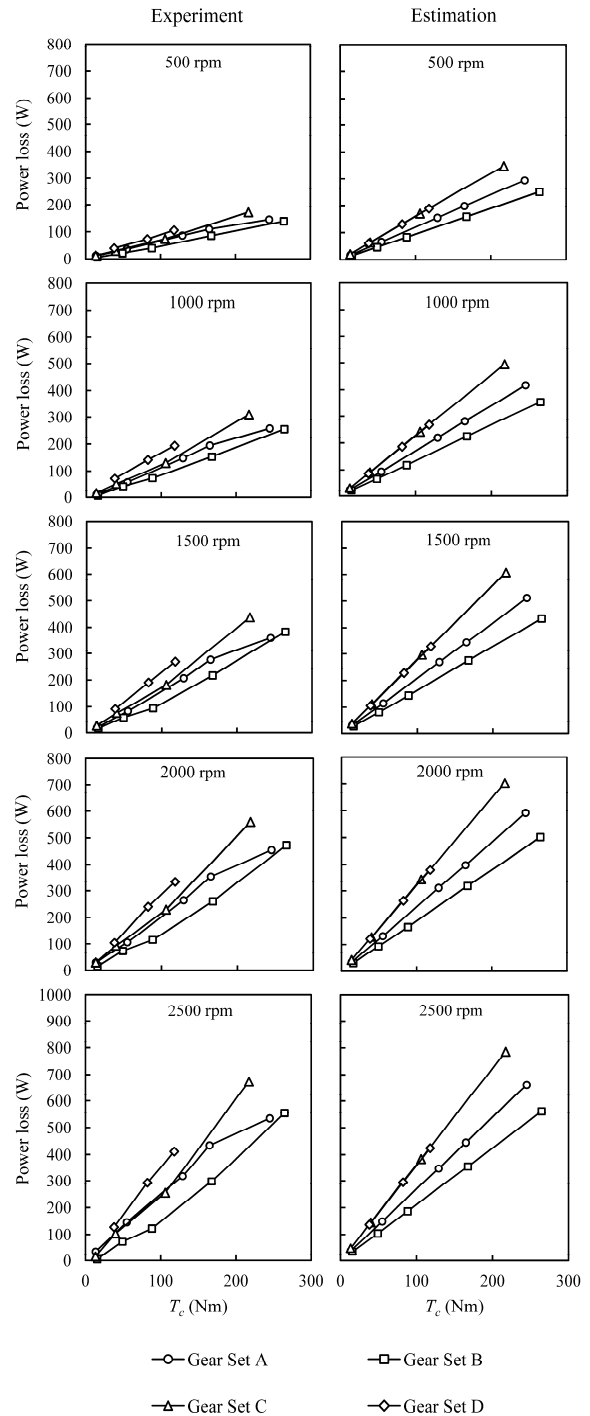
ผลการประเมินและผลการทดลองวัดกำลังสูญเสียจากการไถของเฟืองเฉียง แสดงดังรูปที่ 3 โดยรูปภาพด้านซ้ายคือกำลังสูญเสียที่ได้จากการทดลอง และรูปภาพทางด้านขวาคือกำลังสูญเสียที่ได้จากแบบจำลอง จากรูปเมื่อความเร็วรอบและภาระแรงบิดเพิ่มมากขึ้นจะทำให้กำลังสูญเสียมีค่ามากขึ้นไปด้วย และพบว่าการสูญเสียจากการไถที่ได้จากแบบจำลองและการทดลองมีแนวโน้มสอดคล้องกัน เฉพาะอิทธิพลของโมดูล และมุมกดเท่านั้น แต่อิทธิพลของมุมฮิลิกซ์ และความกว้างหน้าฟันนั้นมีแนวโน้มที่ไม่สอดคล้องกับผลการทดลอง

เมื่อเปรียบเทียบผลของเฟืองเฉียงชุด E กับชุด F ที่มีโมดูลต่างกันพบว่าเฟืองเฉียงชุด E ซึ่งมีโมดูลน้อยกว่าจะมีกำลังสูญเสียต่ำกว่าเฟืองเฉียงชุด F ส่วนผลของมุมกดนั้นเฟืองเฉียงชุด E ที่มีมุมกดมากกว่าเฟืองเฉียงชุด G จะมีกำลังสูญเสียต่ำกว่าเฟืองเฉียงชุด G

เมื่อเปรียบเทียบเฟืองตรงชุด A กับเฟืองเฉียงชุด E ซึ่งมีมุมฮิลิกซ์ 33.5 องศา ผลการทดลองพบว่าเฟืองเฉียงชุด E มีกำลังสูญเสียต่ำกว่า แต่ผลจากแบบจำลองพบว่าเฟืองเฉียงชุด E มีกำลังสูญเสียมากกว่าเฟืองตรงชุด A สำหรับผลของความกว้างหน้าฟันนั้นได้จากการเปรียบเทียบเฟืองเฉียงชุด E กับชุด H กำลังสูญเสียที่ได้จากการทดลองของเฟืองเฉียงชุด E ซึ่งมีความกว้างหน้าฟันน้อยกว่ามีขนาดน้อยกว่าเฟืองเฉียงชุด H ที่มีความกว้างหน้าฟันมากกว่า ส่วนผลการประเมินกลับพบว่าเฟืองเฉียงทั้ง 2 ชุด มีกำลังสูญเสียใกล้เคียงกัน

7. สรุป

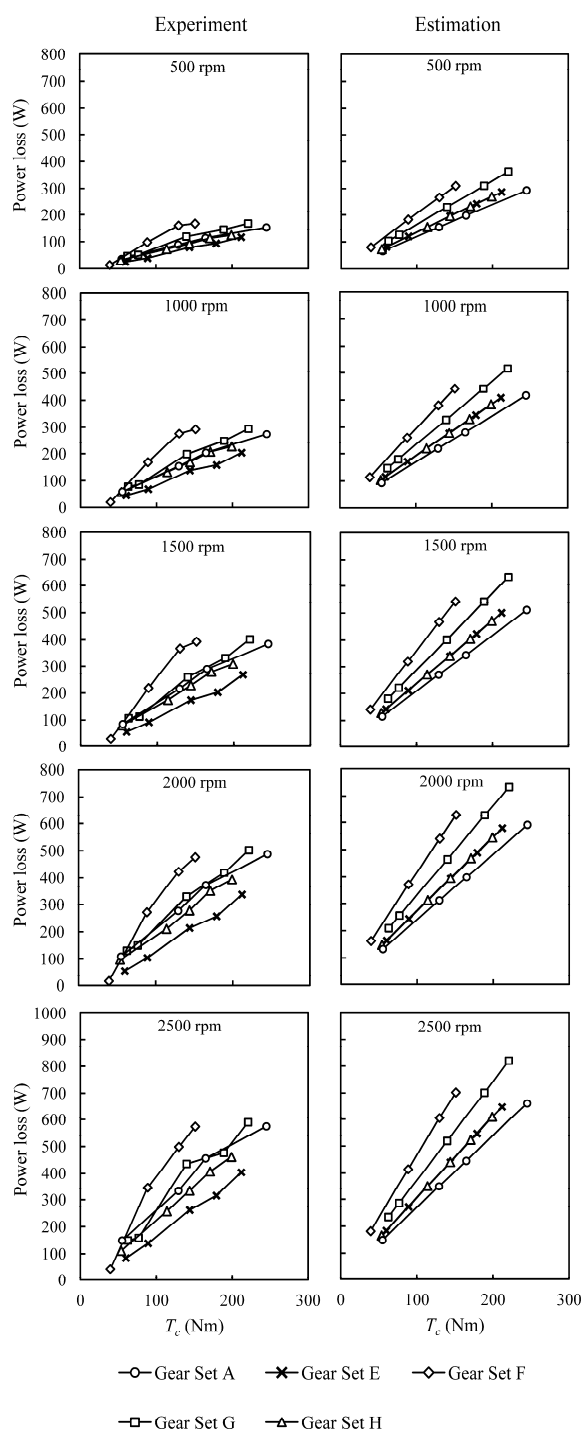
ผลการทดลองพบว่าคู่เฟืองที่มีโมดูล อัตราทด และความกว้างหน้าฟันมากจะมีกำลังสูญเสียมาก แต่คู่เฟืองที่มีมุมกดและมุมฮิลิกซ์มากจะมีกำลังสูญเสียน้อย เมื่อเปรียบเทียบผลการทดลองกับผลการประเมินจากแบบจำลองพบว่าผลของโมดูล มุมกด และอัตราทรมีแนวโน้มสอดคล้องกัน แต่ผลของมุมฮิลิกซ์และความกว้างหน้าฟันมีแนวโน้มไม่สอดคล้องกัน



รูปที่ 2 กำลังสูญเสียจากการไถที่ประเมินได้จากแบบจำลองและที่วัดได้จากการทดลองของชุดเฟืองตรง

8. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้เป็นส่วนหนึ่งของโครงการวิจัย "การศึกษากลไกการเกิดและปัจจัยที่มีผลต่อกำลังสูญเสียเนื่องจากการไถของคู่เฟืองที่มีเพลานานกัน" (MRG5480164) ซึ่งได้รับทุนสนับสนุนจากสำนักงานคณะกรรมการอุดมศึกษาร่วมกับสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัยและจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 3 กำลังสูญเสียจากการไถที่ประเมินได้จากแบบจำลองและที่วัดได้จากการทดลองของชุดเฟืองเฉียง

9. เอกสารอ้างอิง

[1] Petry-Johnson, T., Kahraman, A., Anderson, N.E., and Chase, D. (2007). Experimental Investigation of Spur Gear Efficiency, *Proceedings of the ASME 2007 International Design Engineering Technical Conferences and*

Computers and Information in Engineering Conference, Las Vegas, USA.

[2] Haizuka, S., Kikusaki, T., and Naruse, C. (1998). Studies on Friction Loss of Spur Gears (Effect of Viscosity of Lubricating Oils and Tooth Forms), *Trans. Jpn. Soc. Mech. Eng.*, Vol.64, No.627, pp. 292-299.

[3] Vaidyanathan, A. (2009). *An Experimental Investigation of Helical Gear Efficiency*, Master's Thesis, Graduate Program in Mechanical Engineering, The Ohio State University.

[4] Haizuka, S., Naruse, C., and Yamanaka, T. (1999). Study of Influence of Helix Angle on Friction Characteristics of Helical Gears, *Tribology Transactions*, Japan, Vol. 42: no. 3, pp. 570-580.

[5] Michlin, Y. and Myunster, V. (2002). Determination of Power Losses in Gear Transmissions with Rolling and Sliding Friction Incorporated, *Mechanism and Machine Theory* 2002, Vol.37, pp.167-174.

[6] Anderson, N.E., and Lowenthal, S.H. (1980). Effect of Geometry and Operating Conditions on Spur Gear System Power Loss, *Journal of Mechanical Design, the Century 2 International Power Transmission & Gearing Conference*, San Francisco, California, USA.

[7] Teraucha, Y., Nagamura, K., and Ikejo, K. (1991). Study on Friction Loss of Internal Gear Drives (Influence of Pinion Surface Finishing, Gear Speed and Torque), *JSME International Journal*, Series III, Vol.34, No.1.

[8] Heingartner, P., and Mba, D. (2003). Determining Power Losses in the Helical Gear Mesh; Case Study, *Proceedings of DETC'03 ASME 2003 Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference*, Chicago, USA.

[9] Ratanasumawong, C., Asawapichayachot, P., Phongsupasamit, S., Houjoh, H. and Matsumura, S. (2012). Estimation of Sliding Loss in a Parallel-Axis Gear Pair, *Journal of advanced mechanical*

design, system and manufacturing 2012, vol. 6 (No.1), pp. 88-103.

[10] Misharin, Y.A. (1958). Influence of the Friction Condition on the Magnitude of the Friction Coefficient in the Case of Rollers with Sliding, *Proc. Int. Conf. on Gearing, Inst. Mech. Eng., London 1958*, pp. 159-164.

[11] Benedict, G.H., and Kelly, B.W. (1961). Instantaneous Coefficients of Gear Tooth Friction, *ASLE Transactions*, Vol.4, pp. 59-70.

[12] ISO TC 60, DTR 13989

[13] Drozdov, Y.N., and Gavrikov, Y.A. (1968). Friction and Scoring Under the Conditions of Simultaneous Rolling and Sliding of Bodies, *Wear*, Vol.11, pp. 291-302.

[14] O'Donoghue, J.P., and Cameron, A. (1966). Friction and Temperature in Rolling Sliding Contacts, *ASLE Transactions*, Vol.9, pp. 186-194.

[15] Xu, H. (2005). *Development of a Generalized Mechanical Efficiency Prediction Methodology for Gear pairs*, Doctoral dissertation, Ohio State University.

[16] Diab, Y., and Velez, P. (2004). Prediction of Power Losses Due to Tooth Friction in Gears, *The STLE Annual Meeting in Toronto, Ontario, Canada*.

[17] ชาคิต เย็นที่ (2554). *การวัดและการประยุกต์ใช้แบบจำลองคณิตศาสตร์หาค่ากำลังสูญเสียของเฟืองตรง*, วิทยานิพนธ์ตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย